

Apport des systèmes de systèmes à la pensée systémique

Extraits de *Architecture système & complexité*

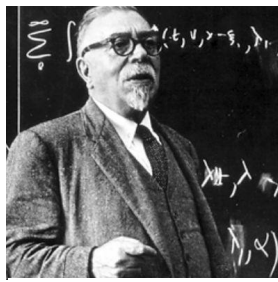
à paraître chez ISTE-Wiley, fin 2019

Conférence pour le groupe Émergence, le 7 octobre 2019

I. Un peu d'histoire ...

**Les années de fondation à l'occasion
de la 2^{ème} Guerre Mondiale**

Années
1940



Norbert Wiener
† 18/03/64 [70ans]



John von Neumann
† 8/02/57 [53 ans]



Alan Turing
† 7/06/54 [41 ans]



Claude Shannon
† 24/02/01 [85 ans]

Années
1950-1960

Projets SAGE, NTDS
→ **MIT**
En France STRIDA,
SENIT
→ **DGA**



Jay Wright Forrester

« If you had the right environment you would get the science, but you could easily have the science in an environment that did not make it effective »

→ Réalisation des modèles pour le Club de Rome

Années
1970-1980

Programmes spatiaux, programmes de défense
On traite séparément les systèmes techniques (C2, C3, C4I) et les systèmes de gestion (en France *MERISE*)
Apparition des 1^{ères} normes comme le *NASA Systems Engineering Handbook* + documents *DGA Programmes d'armement* ...
→ **La théorie des langages de programmation est achevée**

Années
1990-2000 ...

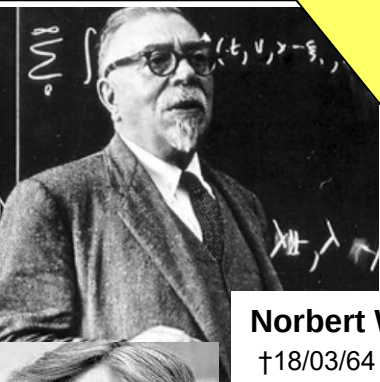
Unification progressive des méthodes de modélisation systèmes autour des langages UML, SysML, BPMN
Infrastructure de communications mondiales et distribution massive de la puissance de traitement
Interopérabilité généralisée des systèmes – Intégration de l'information
Unification des approches systèmes (C4ISTAR) - Architecture d'entreprise
Informatisation massive → Économie numérique, Internet/Web, ...

Naissance de la cybernétique

☞ **Un quatuor avec 2 protagonistes de premier plan + 2 contributeurs éminents**

- Bombe atomique
- 1er vrai ordinateur à programme enregistré à Princeton
- Théorie des automates fiables
- Théorie des jeux

- Théorie des rétroactions et application à l'optimisation des tirs de DCA
- Invention de la cybernétique



Norbert Wiener
† 18/03/64 [70ans]



Claude Shannon
† 24/02/01 [85 ans]

John von Neumann



John von Neumann
† 8/02/57 [53 ans]

Interactions

**MIT
+
IAS**

Norbert Wiener
Claude Shannon

Alan Turing

- « Machine » papier dite de Turing et théorie de la calculabilité
- « Casse » du code ENIGMA à Bletchley Park
- Machines COLOSSUS et ACE



Alan Turing
† 7/06/54 [41 ans]

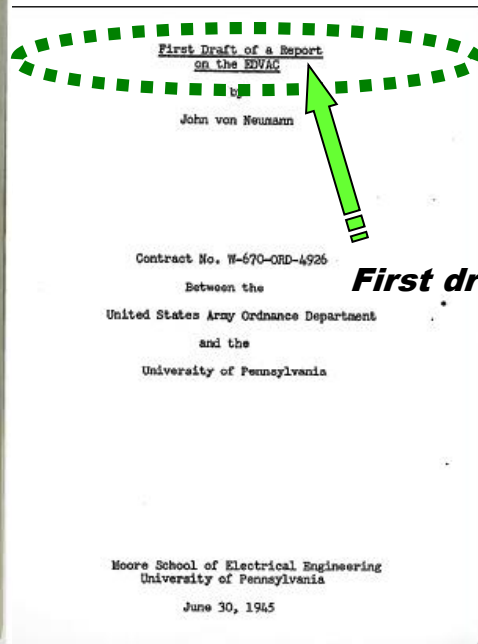
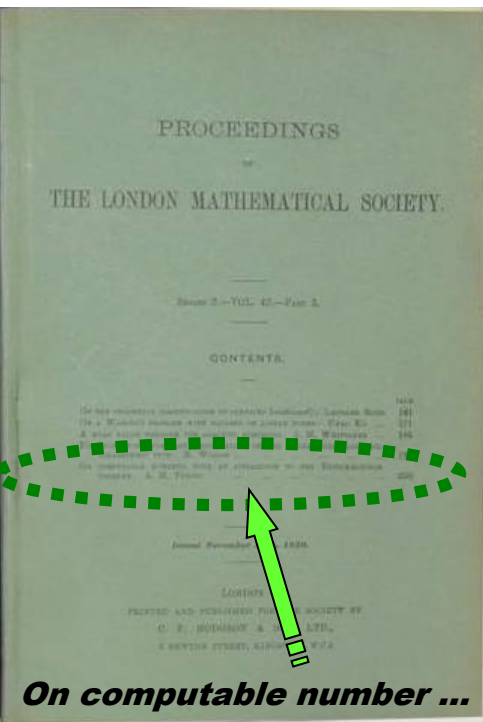
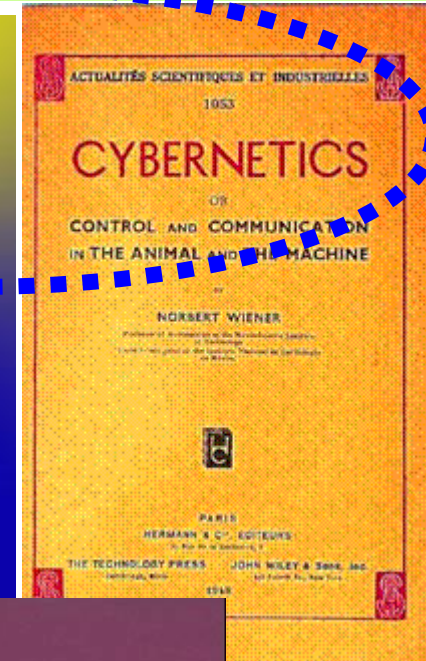
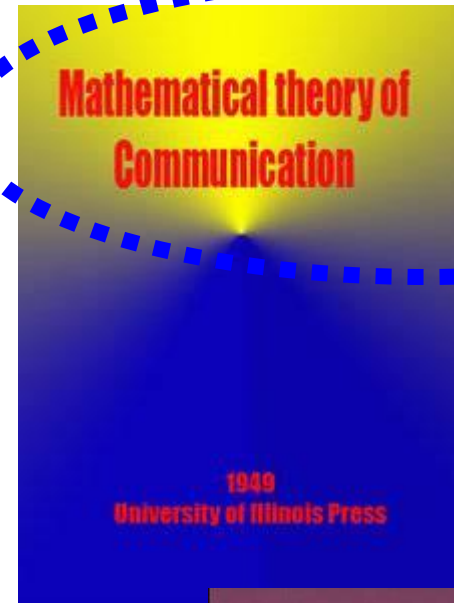
Travaux fondateurs

↩ **Alan Turing, 1936 :**

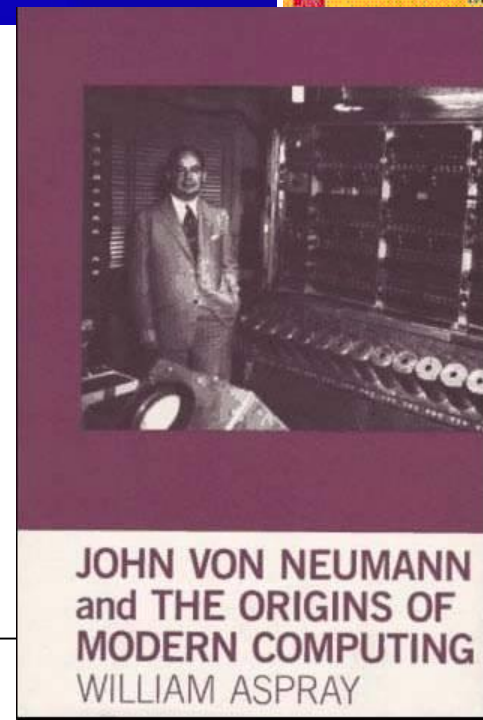
↩ **John von Neumann, 1945 :**

↩ **Norbert Wiener, 1948 :**

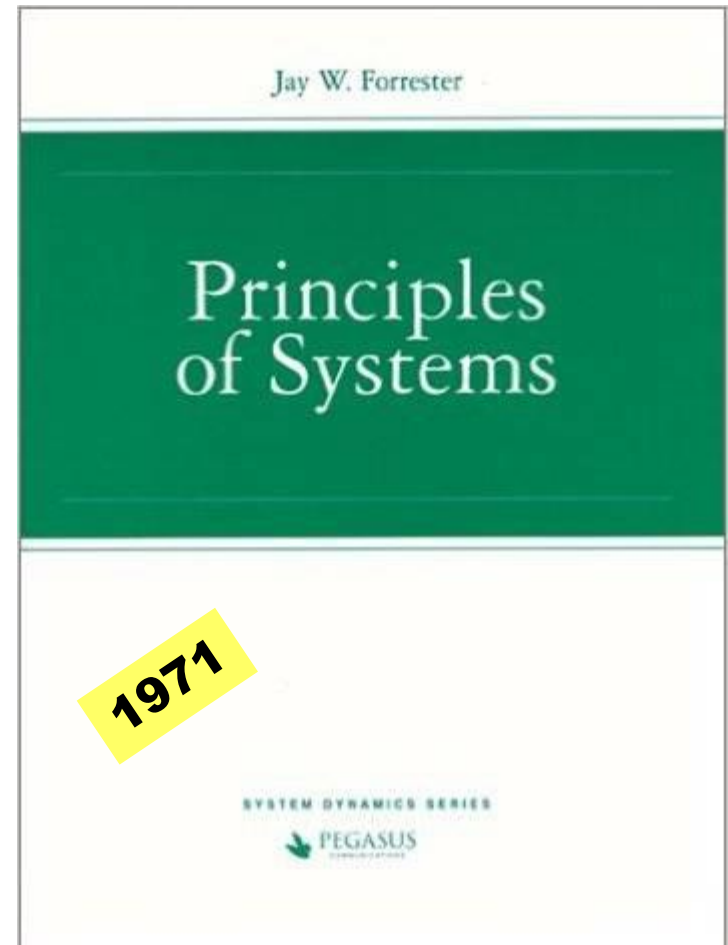
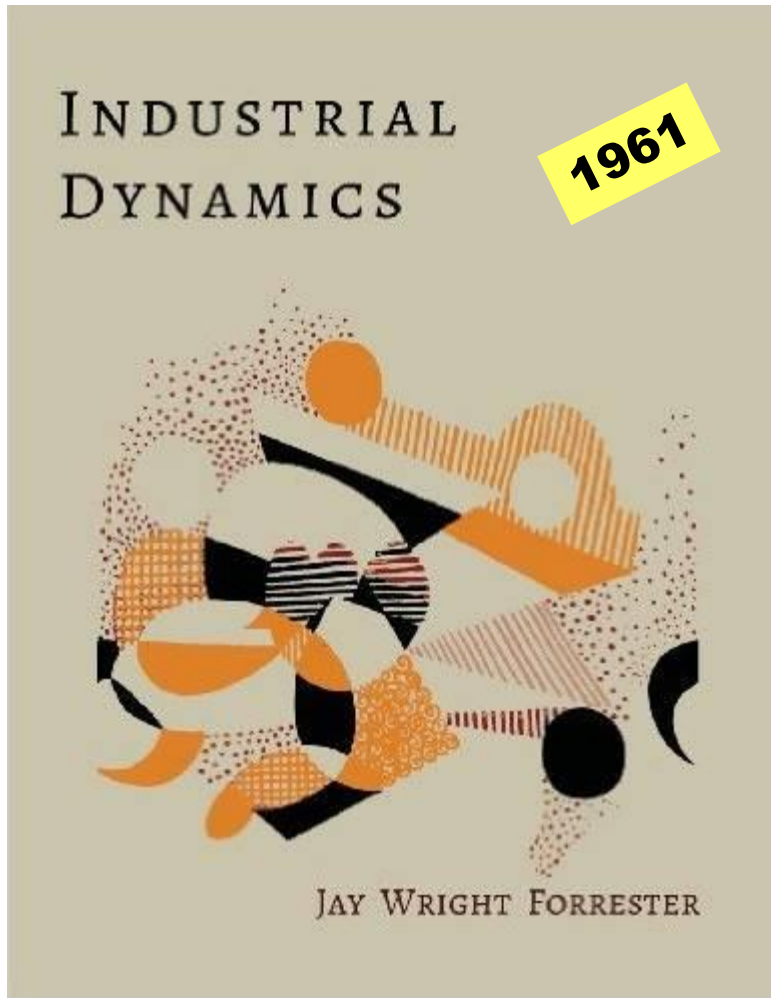
↩ **Claude Shannon, 1949 :**



First draft ... EDVAC



Deux ouvrages célèbres



L'idée géniale de Wiener : La science de l'intégration

↪ Distinction entre **juxtaposition** [concaténation statique et absence d'interaction] et **intégration** :
☞ un objet composite « intégré » apparaît à son usager comme **une entité dynamique unique formant un tout**, fait d'éléments distincts devenus indissociables par l'opération d'intégration

↪ On peut dès lors **affirmer** que $1 \oplus 1 \oplus \dots \oplus 1 \rightarrow 1$

☞ C'est une **union différenciée** – L'objet intégré est plus résilient, il suit des règles logiques qui lui sont propres ; il est **simultanément** plus complexe [intérieur] **ET** plus simple [extérieur]

↪ **Contrôler/réguler ET Communiquer**

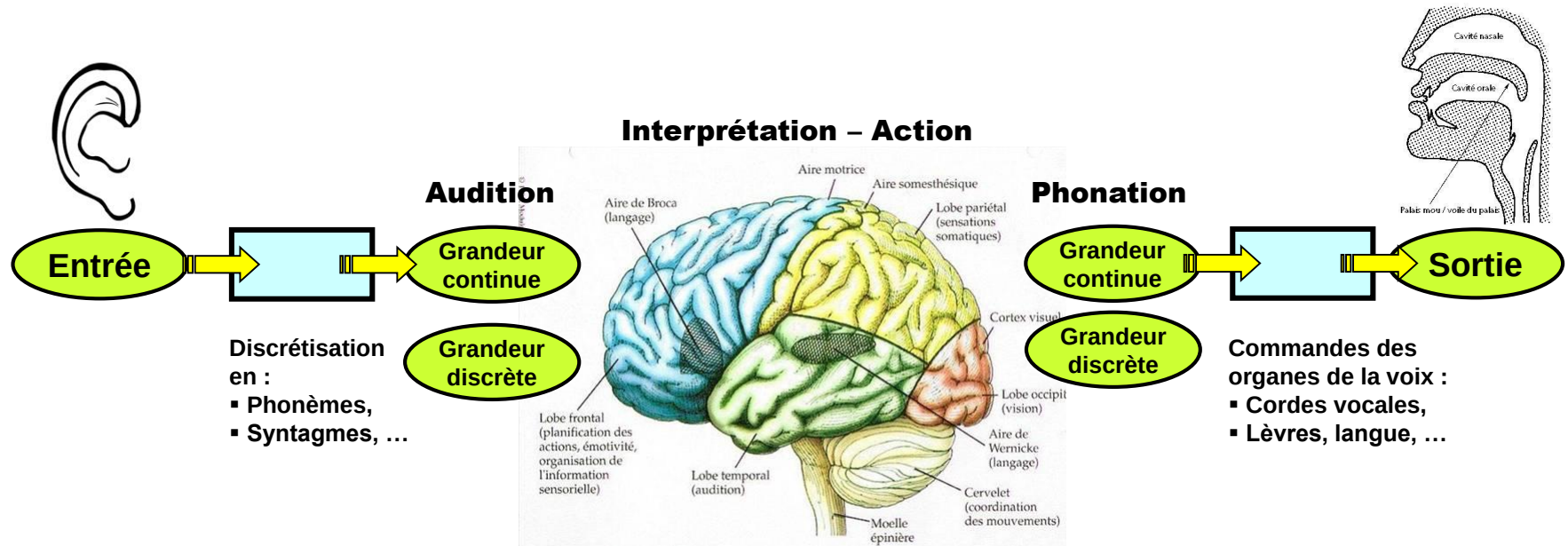
Comment unifier/intégrer ?

↪ Apprendre à « **VOIR** » les **abstractions**, « ce 6^{ème} sens », ce qui est commun et stable [*une nouvelle forme somatique*] au milieu de ce qui a toutes les apparences d'un chaos hétéroclite où tout bouge en permanence

↪ Émergence d'un modèle informationnel abstrait qui va organiser les échanges logiques entre ces différents équipements et les opérateurs humains qui les manipulent en préservant le bon sens

↪ Identifier le langage de ces interactions et le mettre en œuvre dans le monde réel grâce à des équipements « magiques » fruits de l'intelligence et de la créativité
→ les **transducteurs**

Le cerveau « transducteur »



Aujourd'hui, le nombre de neurones est évalué à plus de 100 milliards, chaque neurones ayant en moyenne 10.000 connexions [mais 100.000 pour les neurones du cervelet]

👉 A l'époque des pionniers, on ne savait pas trop ... on a longtemps vu le chiffre de 10 milliards, et sans la régénération des neurones constatée bien plus tard ...

D'où la « définition » classique ...

→ **Système** → **Ensemble d'éléments en interactions qui opèrent/interagissent en vue d'un but**

Mais il faut immédiatement préciser :

- ↪ Les éléments [*processus*] sont plongés dans un **environnement** spatiotemporel avec lequel ils interagissent, évoluent, se transforment, ... en bref « vivent »
- ↪ Les éléments sont soumis aux lois générales de l'univers → **Entropie, défaillances**, retour au **désordre** indifférencié, ... si rien n'est fait et s'ils restent coupés de leur environnement
- ↪ Pour interagir ⇒ il faut communiquer ⇒ il faut un langage ⇒ il faut des règles partagées, des conventions « une **grammaire** »
- ↪ Le but définit un invariant qui organise/structure/intègre les comportements attendus ⇒ C'est un **modèle** ⇒ C'est de l'**information** ⇒ C'est de l'**organisation** ⇒ **Architecture**
- ↪ Et se poser *in fine* la question fondamentale : **pourquoi et comment « ça tient » ? Par quel(s) mécanisme(s) ?**

→ **Un système est donc défini par un projet [*ensemble de processus*] de construction qui est lui-même un système**

II. Interopérabilité – Systèmes de systèmes

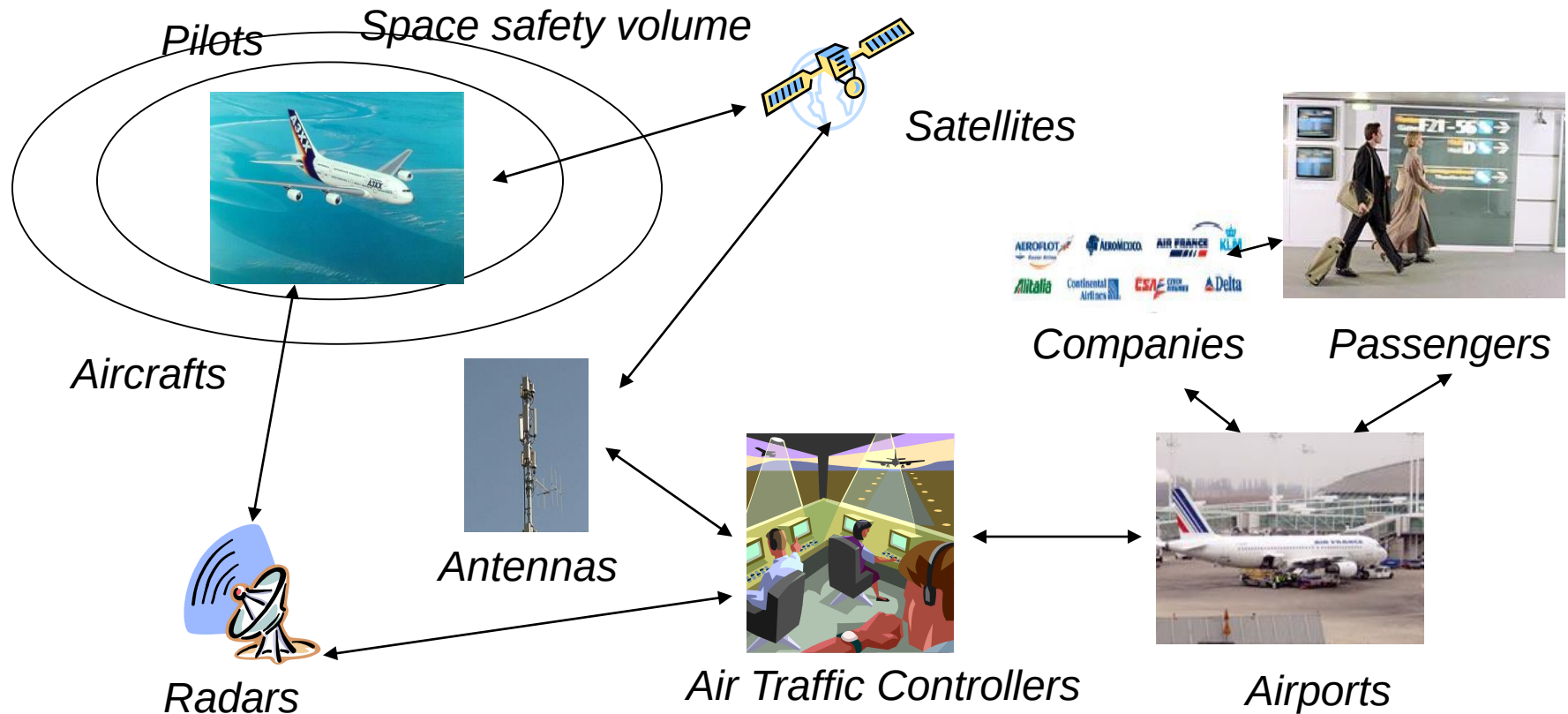
Qq. exemples

**Une notion qui arrive au 1^{er} plan
dans les décennies 1980-1990 avec
les architectures distribuées**

Interopérabilité à l'époque de la révolution industrielle



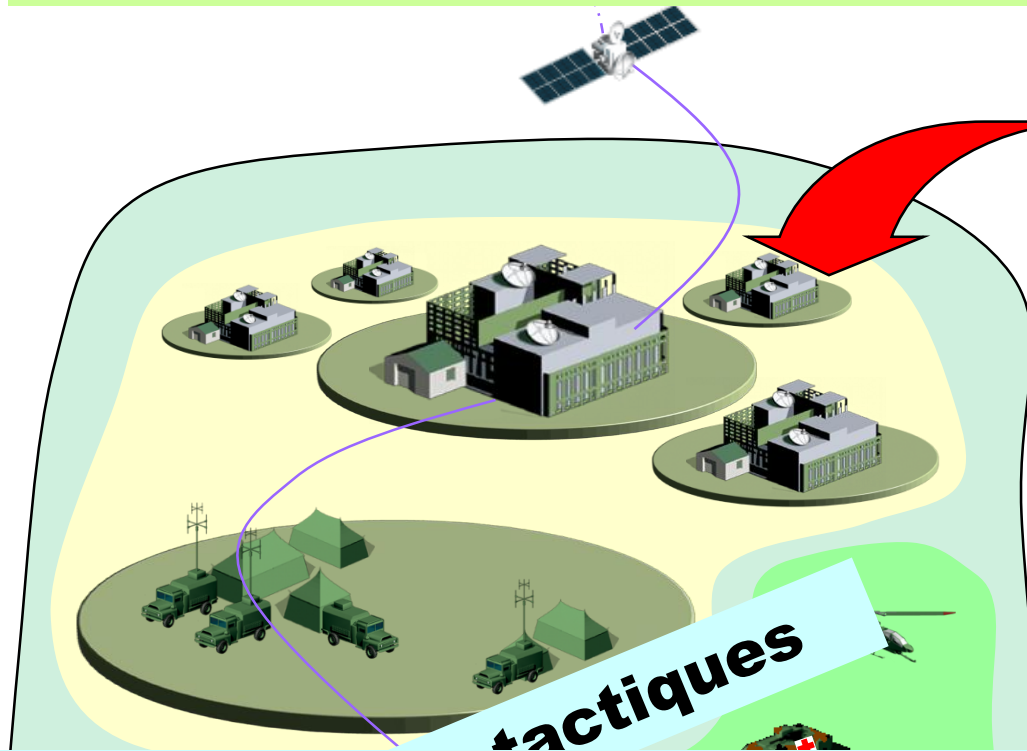
Cohabitation des équipements et des acteurs humains → Le contrôle aérien



Très grand nombre de cas d'emplois possibles, y compris en cas de pannes

Systemes de Systemes – C4ISTAR

Command, Control, Communications,
Computers, Information/Intelligence,
Surveillance, Targeting Acquisition
and Reconnaissance



Fédération NC1

SIO

SORIA

SIO 0-3

SILRIA

ATLAS

SICS

MARTHA

MPME

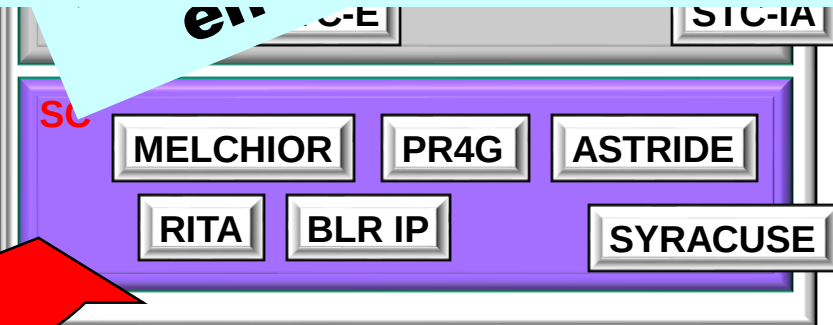
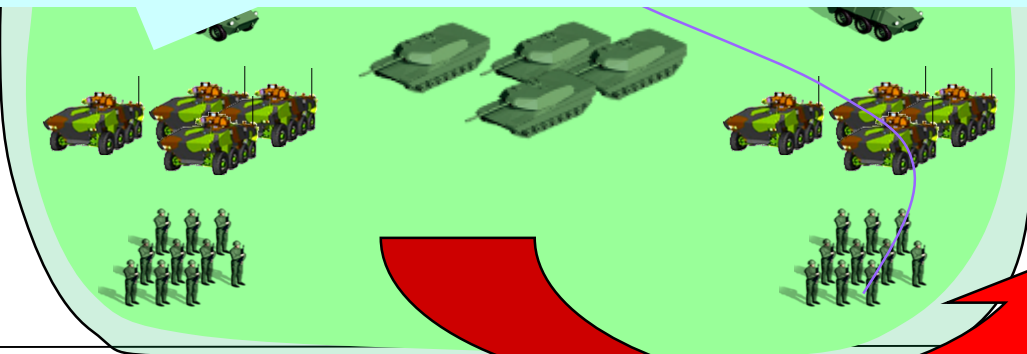
SITALAT

SIT C

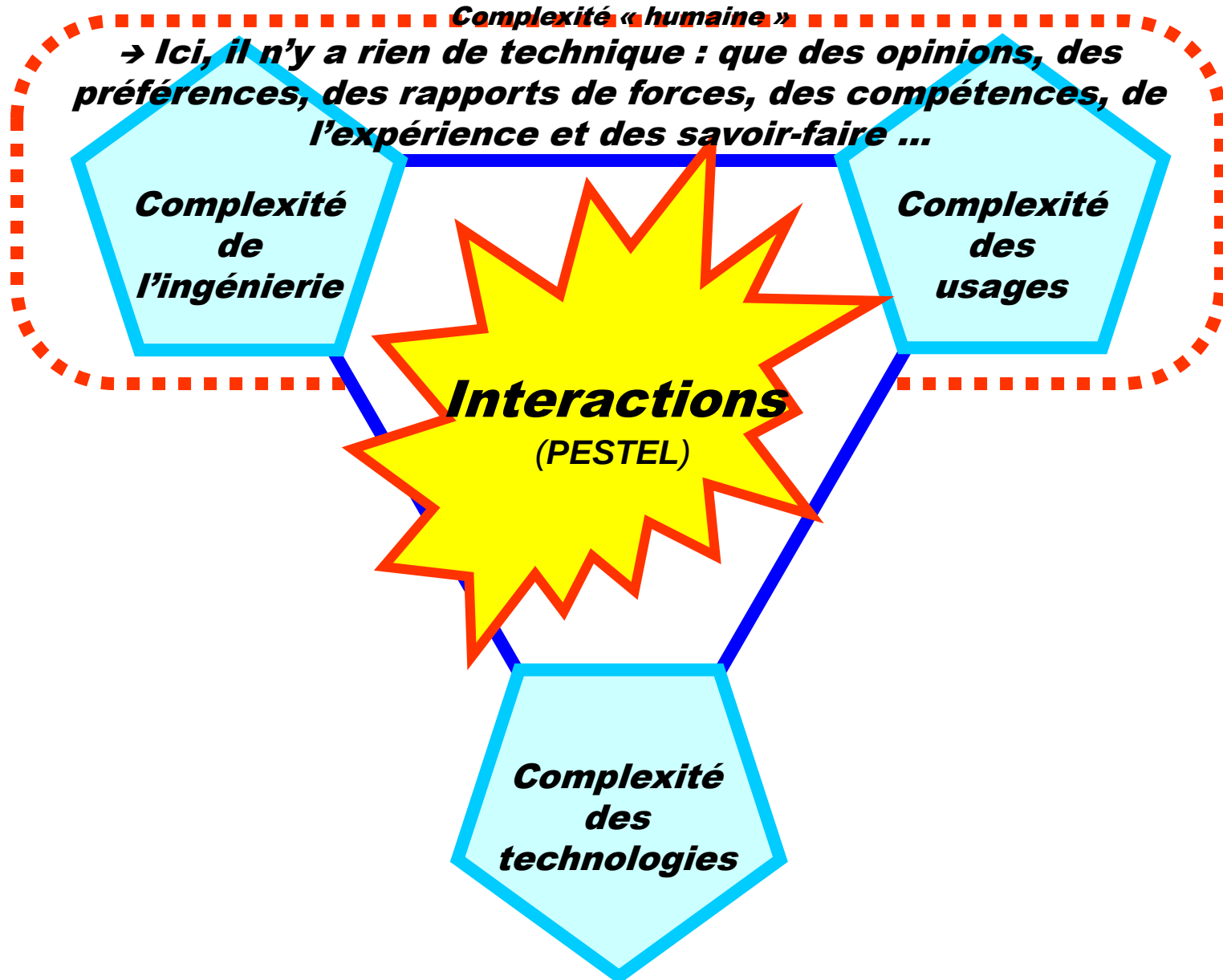
DétecBio

systems

Plus de 30 millions de lignes de code rien que pour
l'armée de terre

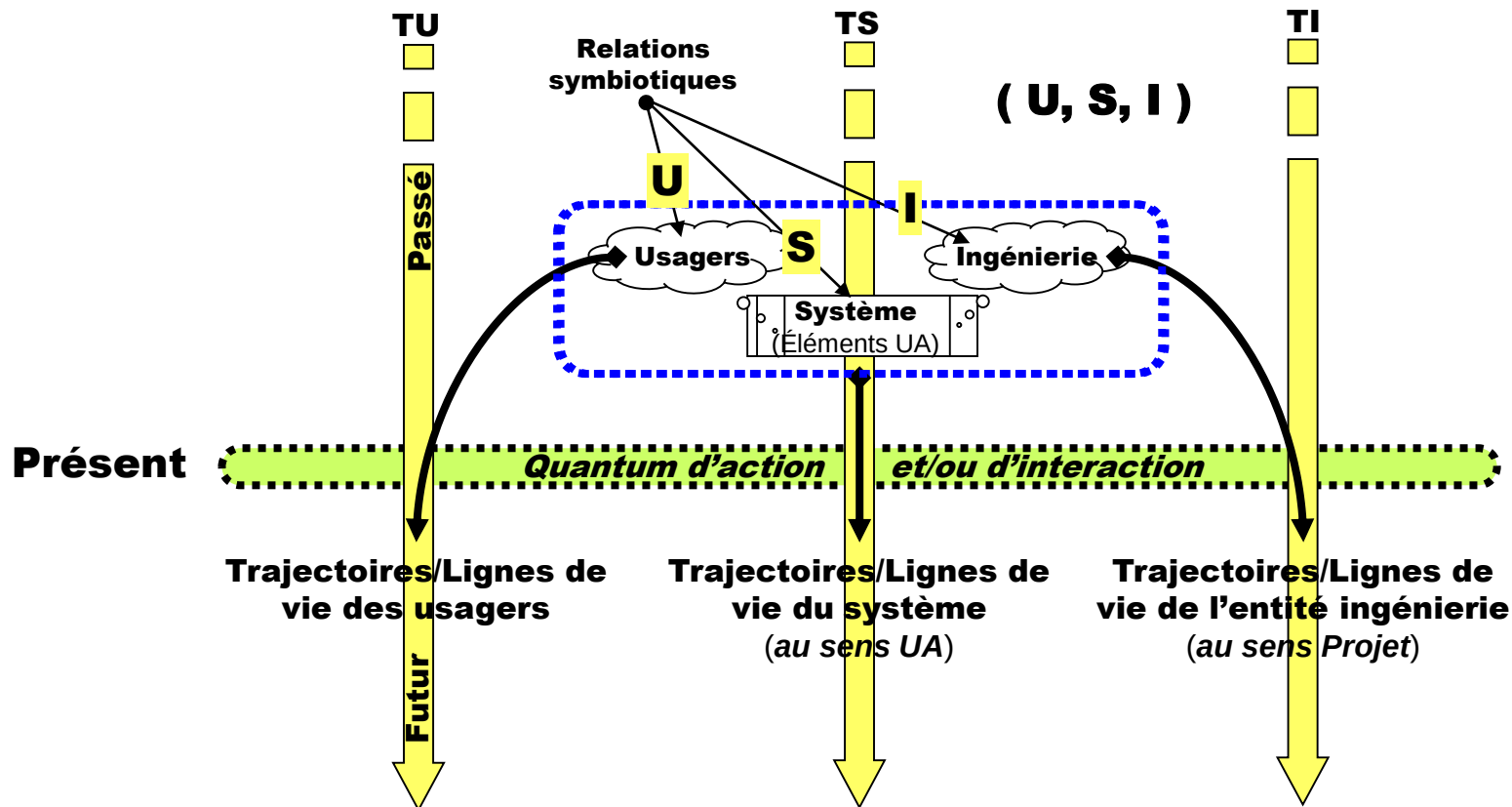


La nouvelle ingénierie de la complexité



Une nouvelle logique : la logique dite « capacitaire »

Trois trajectoires en interactions dynamiques



En résumé

- **Au départ, tout est mécanique : tringles, câbles, chaînes, engrenages, ...**
- **Circuits électriques, puis hydrauliques**
- **Début de l'électronique dans les années 1930, avec signal analogique + mécanismes d'amplification + transducteurs**
- **Début de la digitalisation dans les années 1950-1960 sur réseaux filaires**
- **Généralisation du digital et des signaux sur substrats électromagnétiques et optiques**
 - ☞ **Toute l'interaction est immatérielle**

III. Les modèles de l'interopérabilité

Les conditions de l'interaction

Pour que les usagers des système S1 et S2 puissent interopérer de façon cohérente entre eux, il est nécessaire que :

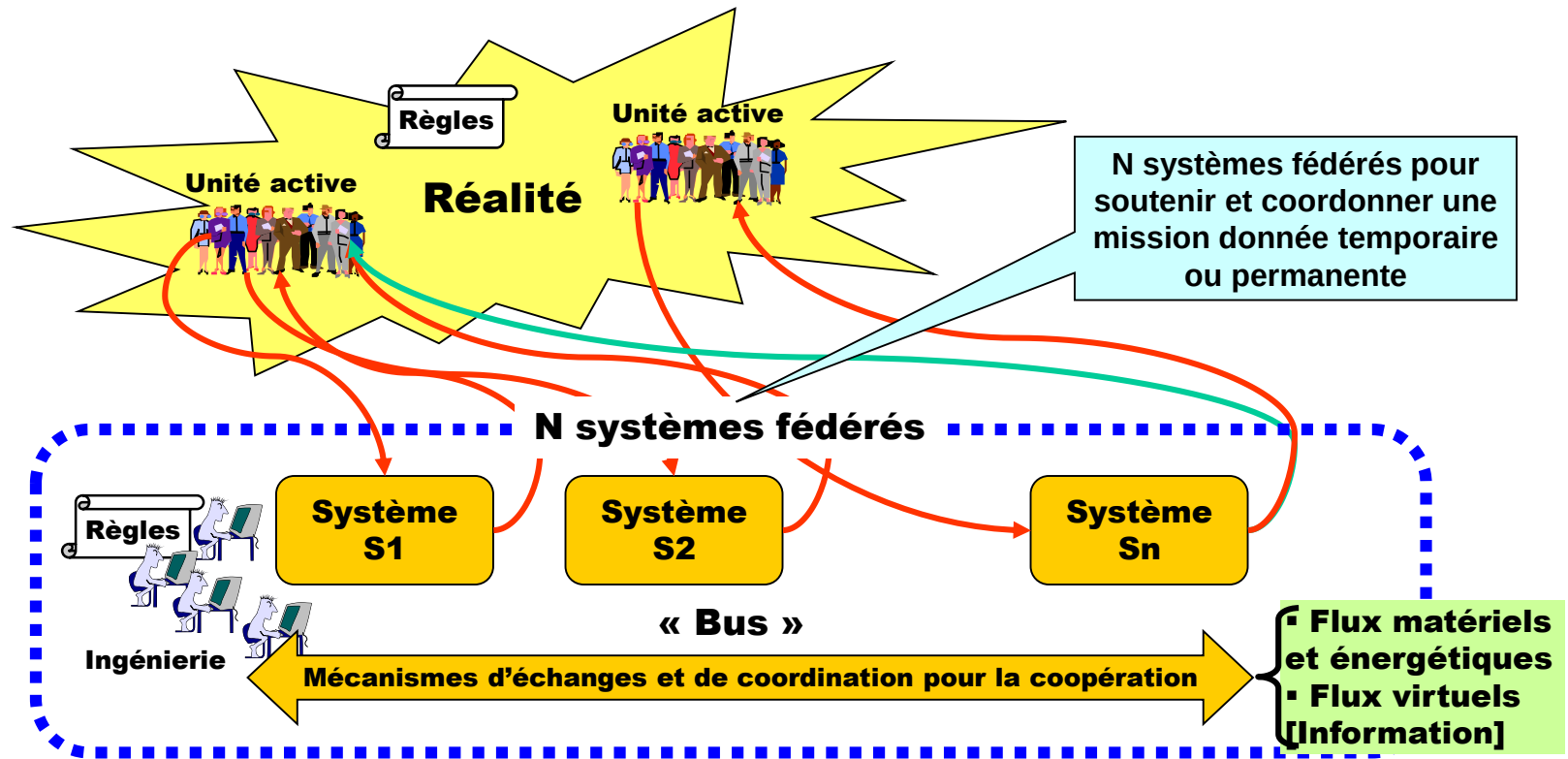


→ S1 ait connaissance des ressources de S2 qui lui sont accessibles, en qualité et en quantité

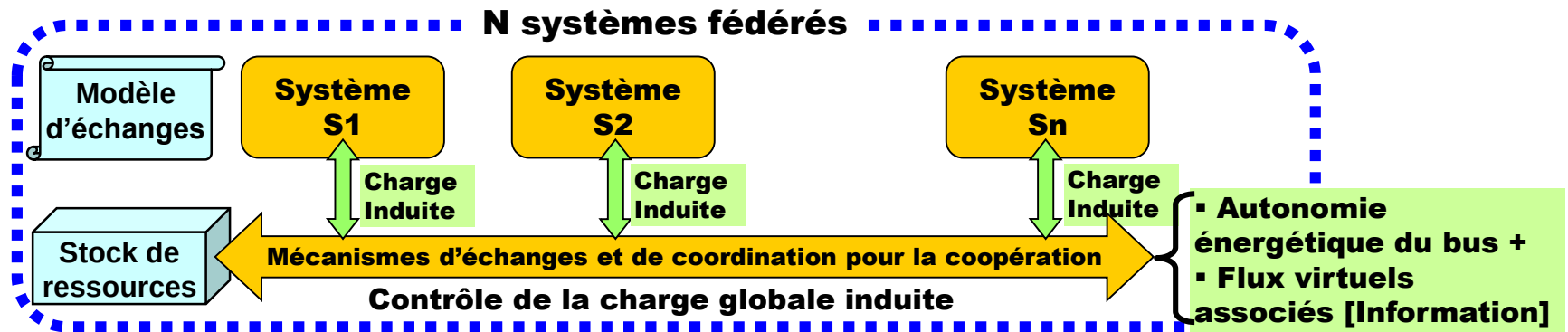
→ S2 ait connaissance des ressources de S1 qui lui sont accessibles, en qualité et en quantité

→ D'où nécessité absolue d'un modèle d'échange commun au deux, dans un langage indépendant de S1 et de S2, mais qui doit être pouvoir traduit sans perte d'information dans chacun des langages spécifiques à S1 et S2

Équilibration des flux

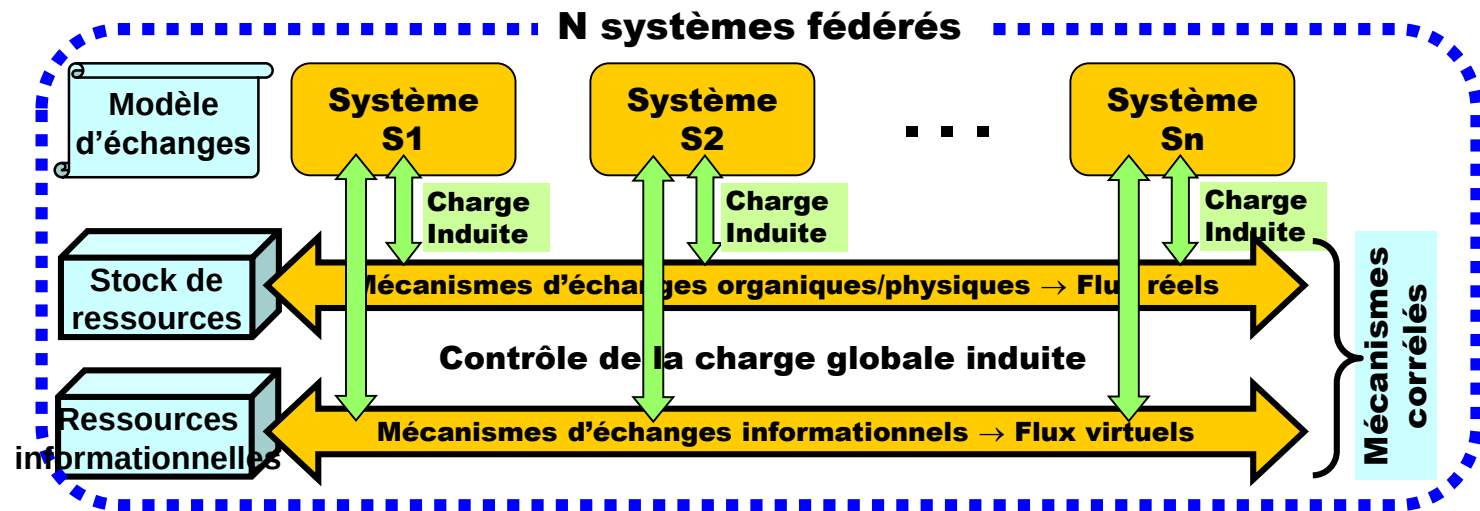


Équilibrage des ressources : logique capacitaire

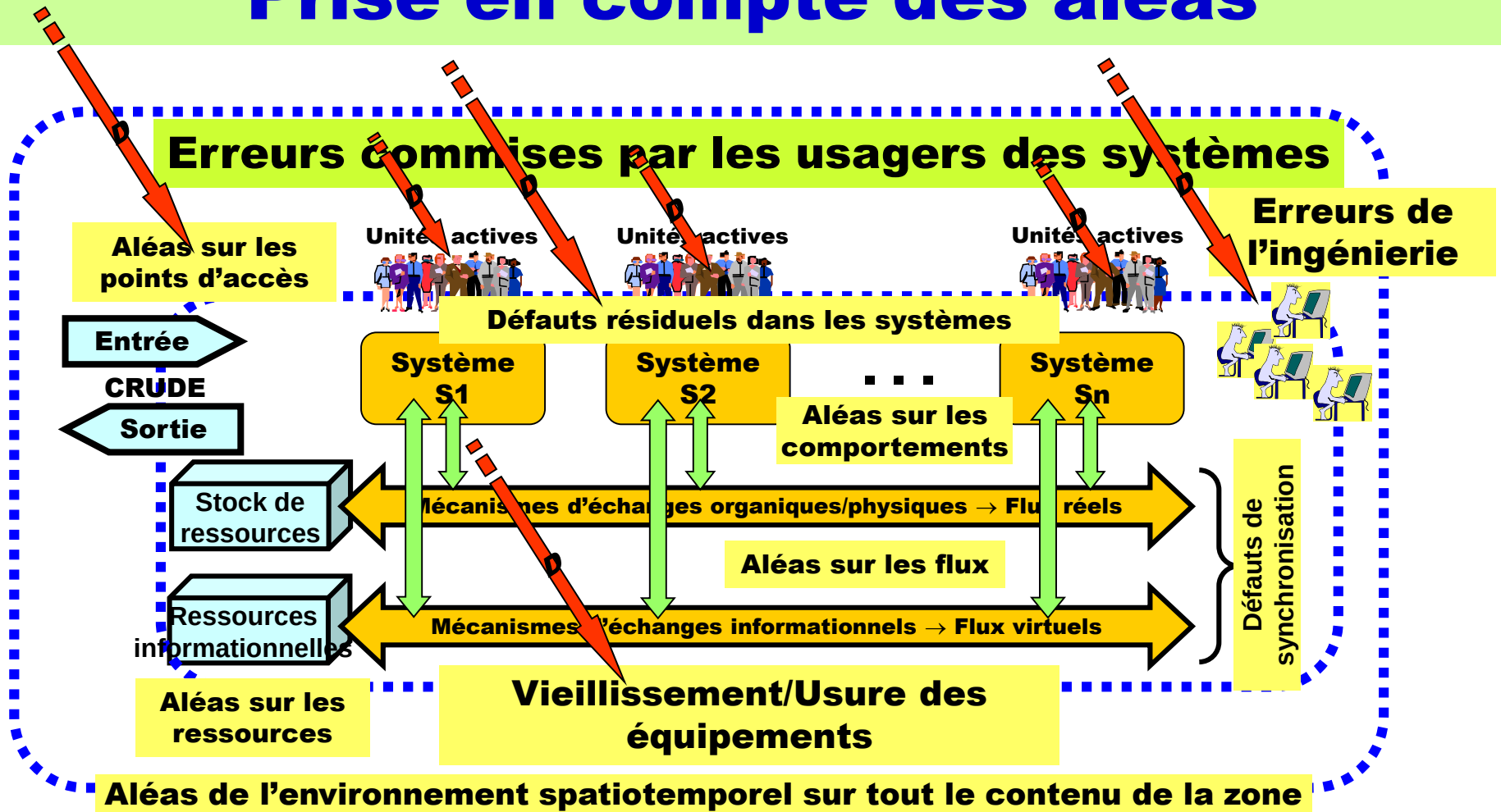


Pour optimiser les ressources, celles-ci sont mises en pool, de façon à les répartir en fonction des besoins *hic & nunc*

Équilibration globale : intégration des flux d'information et capacité à gérer ce flux fonction des aléas



Prise en compte des aléas

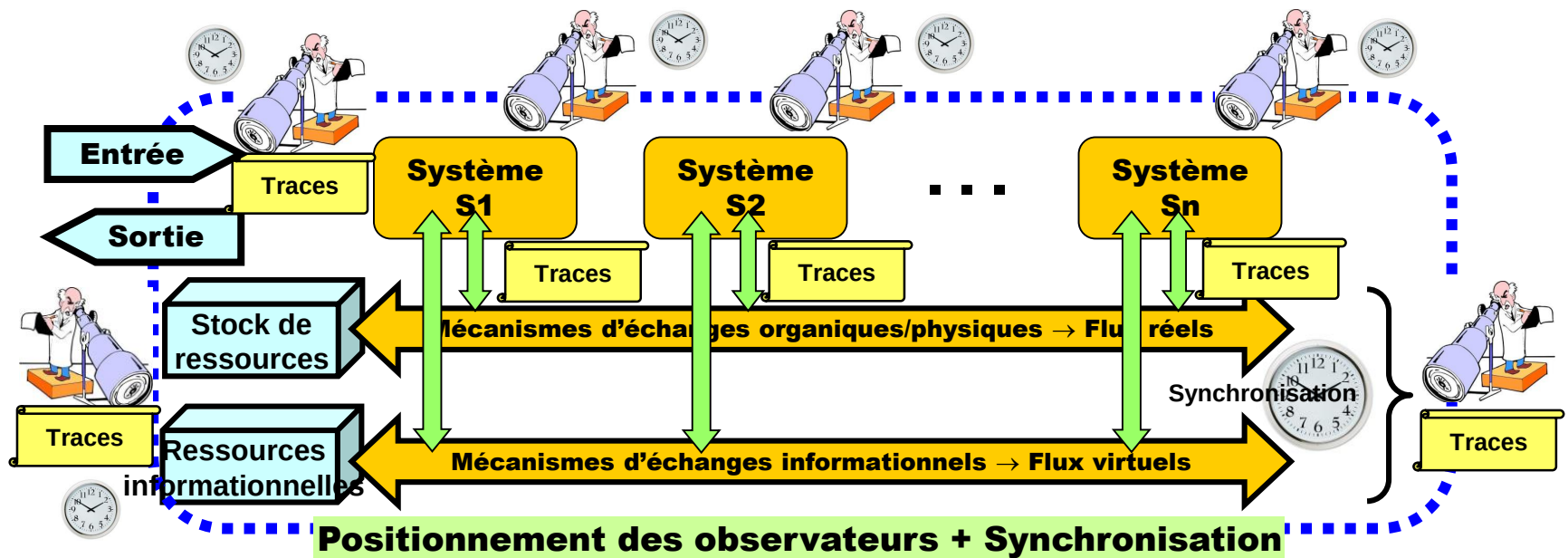


Dans les systèmes, l'erreur est partout
Ses métastases peuvent rendre les pannes incompréhensibles

Rôle crucial des observateurs : contrôle des erreurs

→ Les statistiques en ergonomie font apparaître des taux d'erreurs humaines de l'ordre de

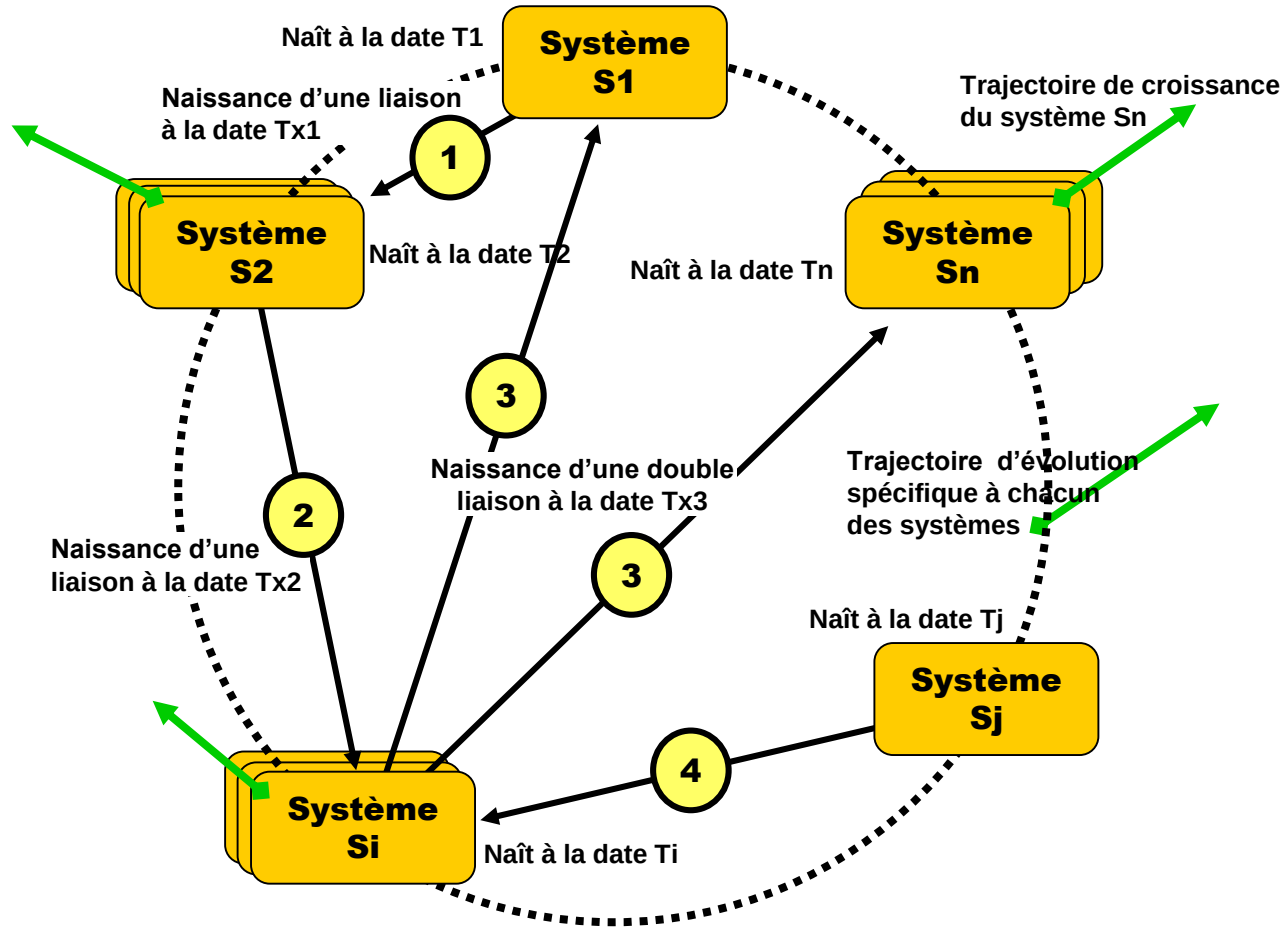
☞ **5 à 10 erreurs par heure d'activité**



**Le choix des points d'observation est un aspect
fondamental de l'architecture**

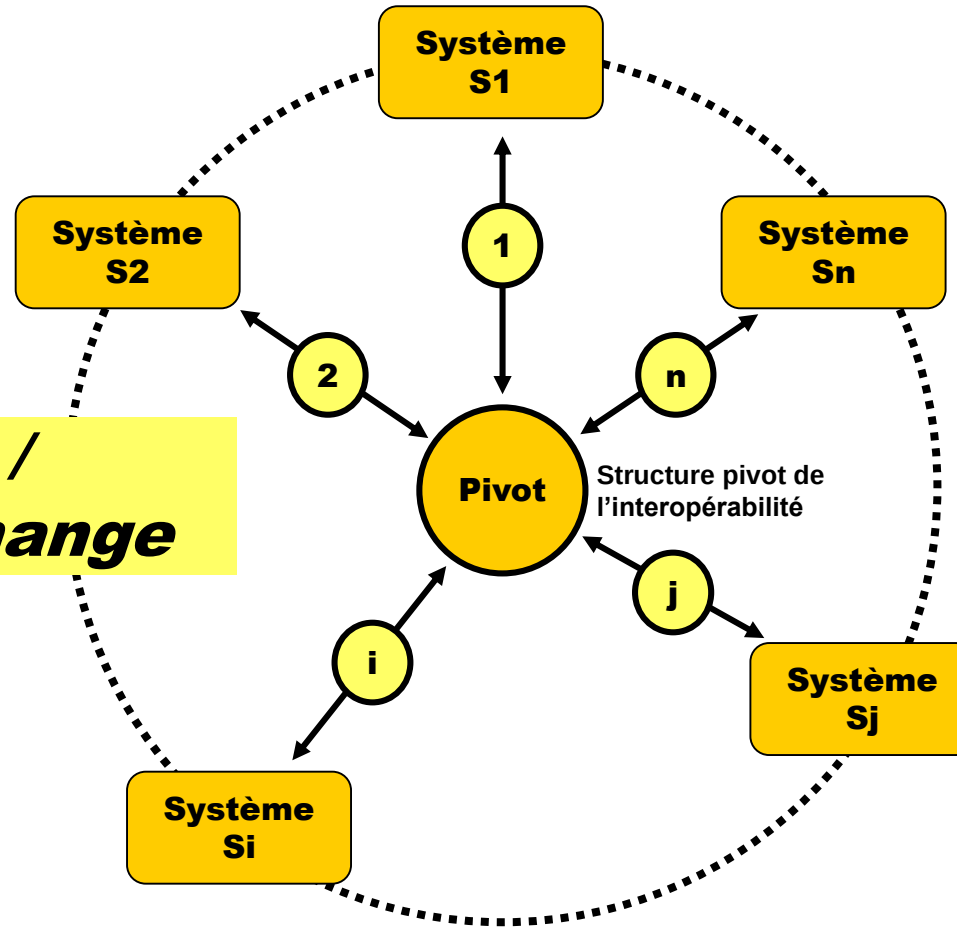
☞ **Essentiel à la compréhension des pannes**

De la juxtaposition à l'intégration 1/3



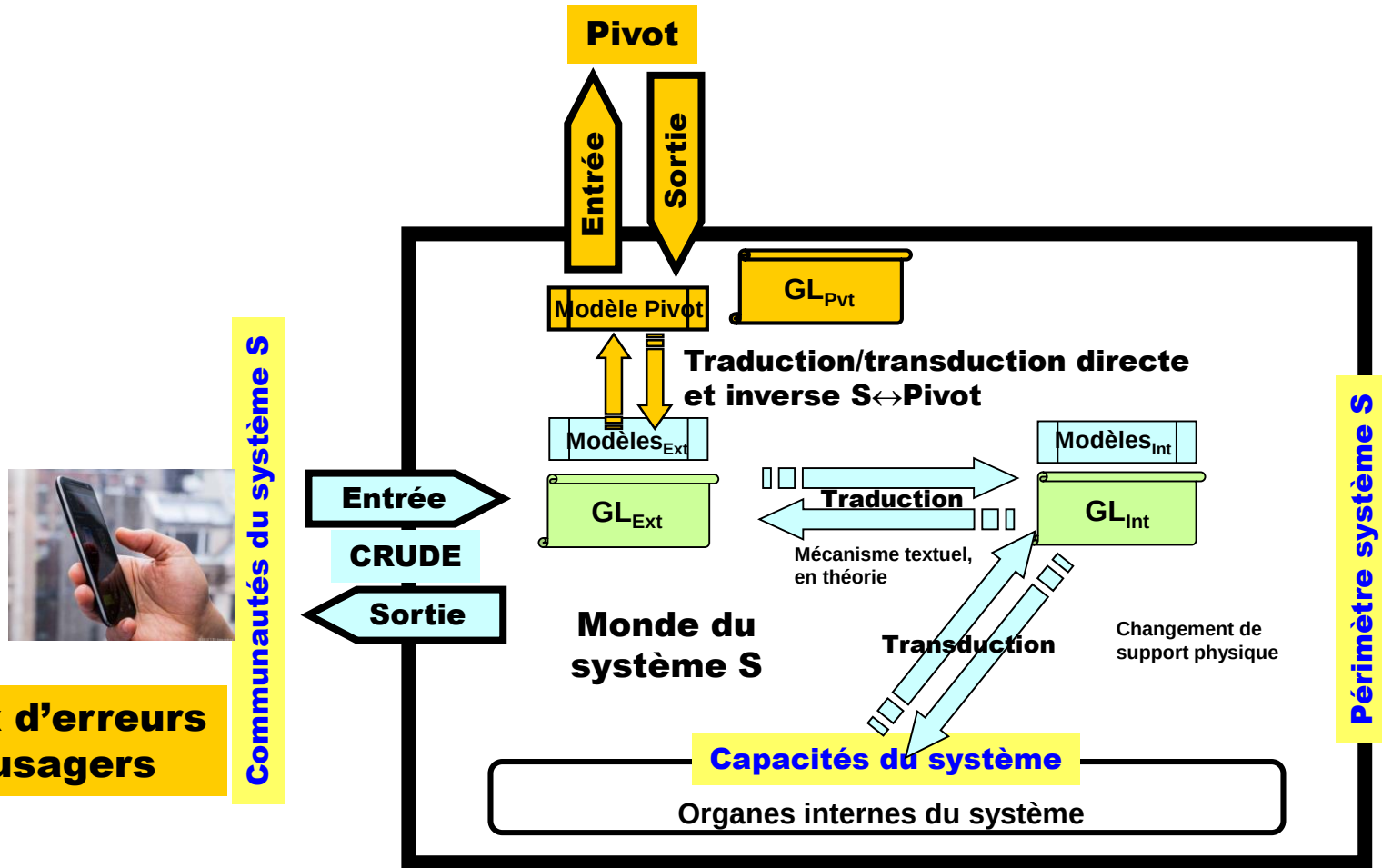
De la juxtaposition à l'intégration 2/3

***Modèle pivot /
Modèle d'échange***



De la juxtaposition à l'intégration 3/3

Architecture du modèle d'échange



Fondamentales en termes de survie

↳ **Modularité vraie des éléments du systèmes**

- Notion d'élément autonome qui se décante dans les années 1990 → *Autonomic Computing*

↳ **Assemblage hiérarchique du système**

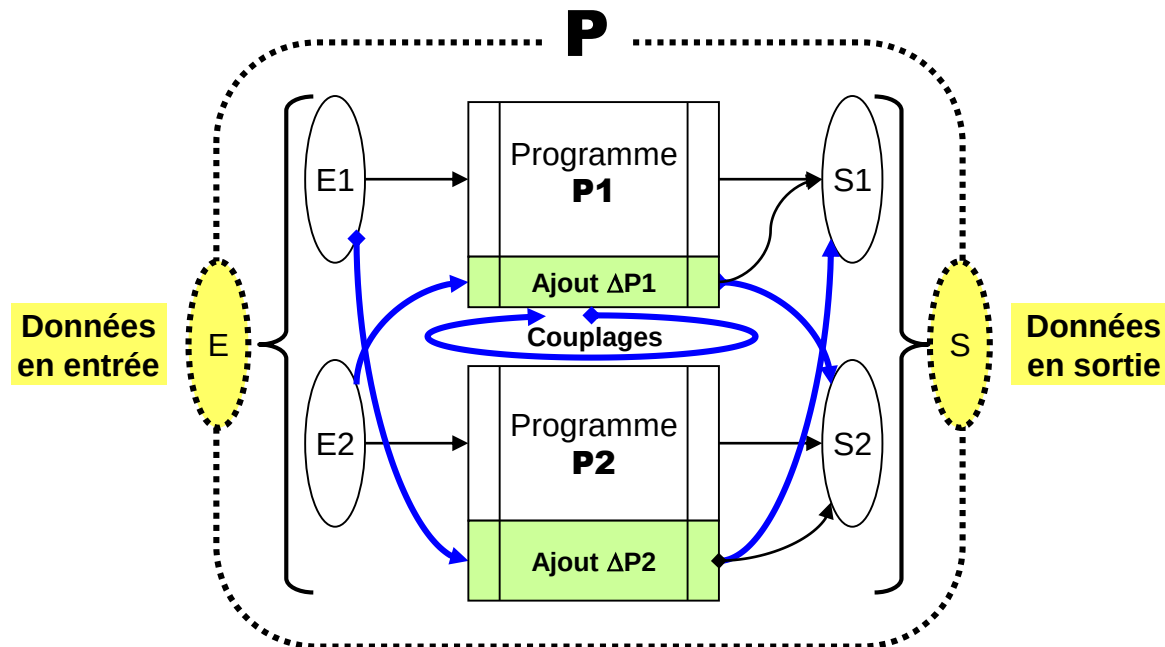
- Bien identifié dès les années 1960-1970, en particulier via le travail de H. Simon, *Sciences of the artificial*, Chap. 8

↳ **Confinement des erreurs – Intégration**

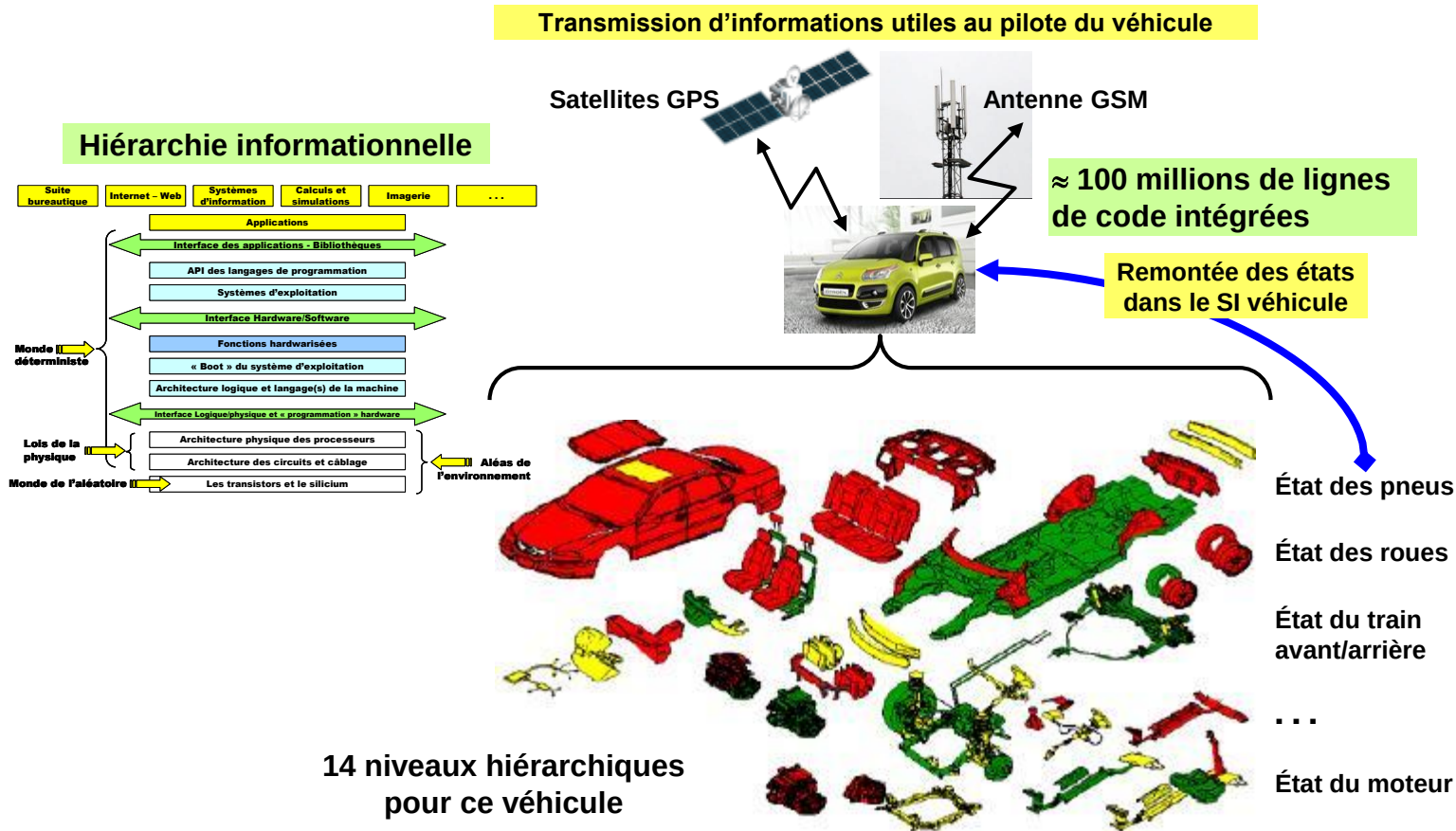
- Ingénierie des interfaces appréhendée en termes de langages et de machines abstraites
- Notion de chemin(s) d'intégration

Anatomie de l'opérateur d'intégration

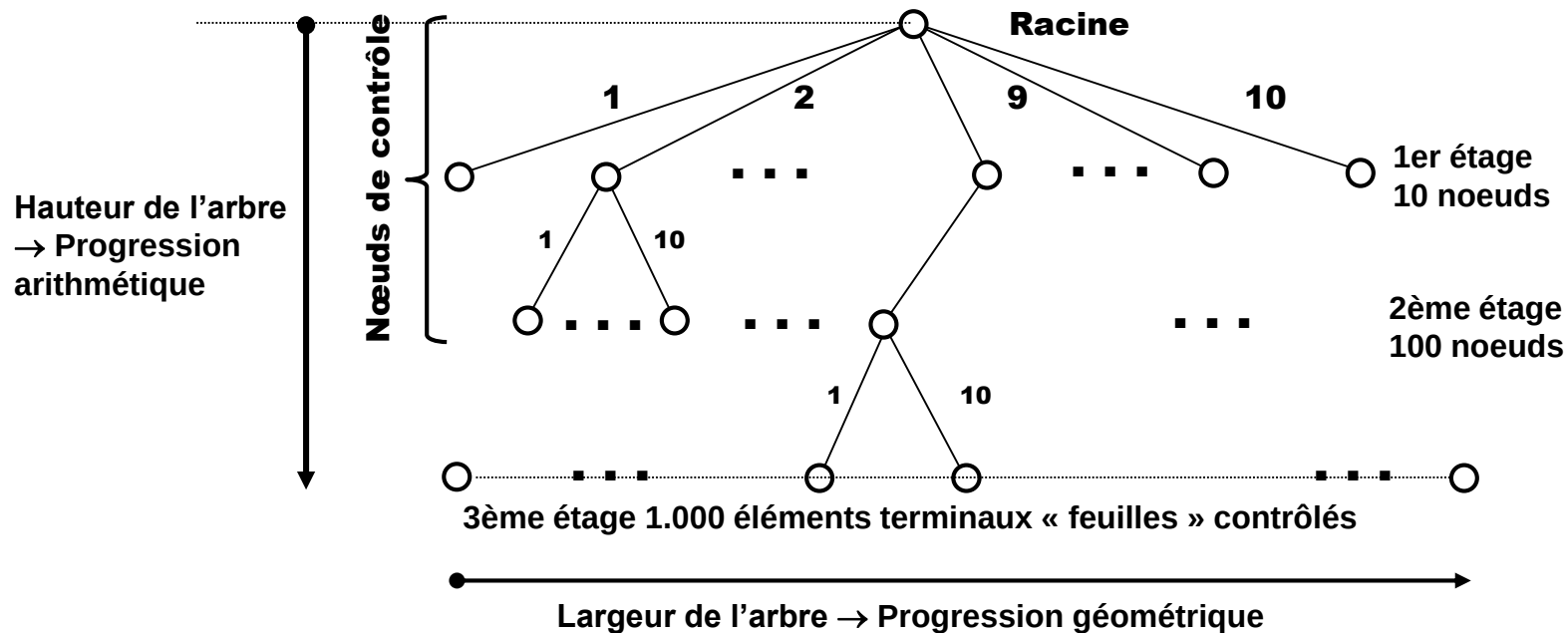
$$\mathbf{P1} \otimes \mathbf{P2} \rightarrow \mathbf{P} \quad [\text{ou } 1+1 \rightarrow 1]$$



Complémentarité des hiérarchies



Arbres hiérarchiques



IV. Les résultats

Trois principes fondamentaux

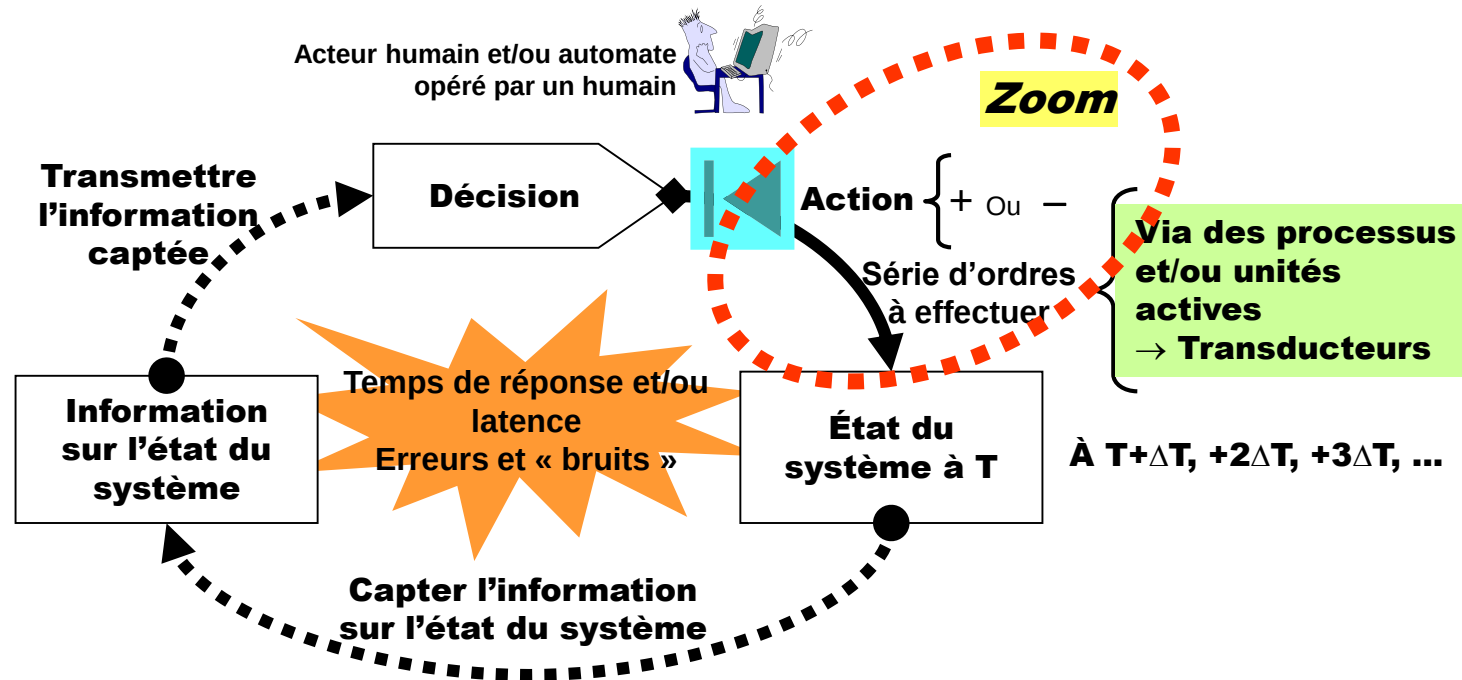
**Mise en forme effective des méthodes et
des solutions découvertes grâce aux
problématiques introduites par
l'interopérabilité des systèmes**

Principes de la systémique

- ↪ **Principe 1 : La capacité de contrôle** de la boucle de régulation assurant la cohésion interne du système et de ses éléments détermine la **taille du système élémentaire intégré** et sa **spécificité*** [*Latence de la boucle*]
- ↪ **Principe 2 : La coopération** entre systèmes régulée par le **métamodèle/référentiel** permet une union différenciée qui assure la **cohérence** et l'**interopérabilité** du **système de systèmes** ainsi formé, tout en augmentant sa capacité de survie
- ↪ **Principe 3 : Erreurs et défauts** sont dans la nature intime de notre univers ☞ **le problème n'est donc pas de les éliminer mais de les compenser**, d'où **OBSERVER, MÉMORISER, DIAGNOSTIQUER, et CORRIGER** pour **s'organiser et survivre aux aléas**

Feedbacks / Rétroactions

👉 Le problème du contrôle des entités



Question fondamentale : Quelle est la capacité de régulation d'une boucle de rétroaction compte tenu de sa structure ET de la nature du phénomène à réguler ?

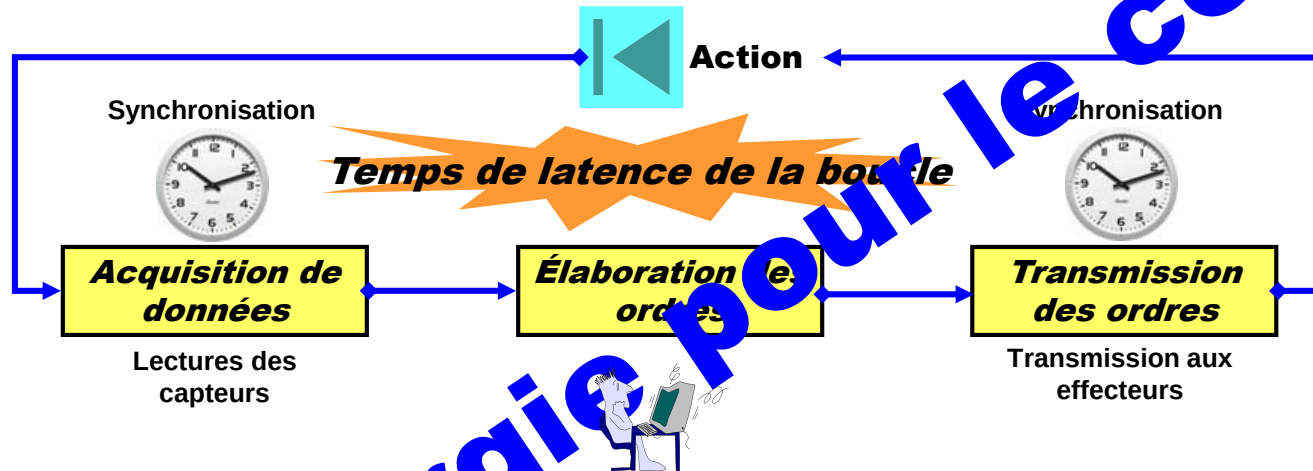
👉 Cette boucle fondamentale est le cœur de l'opérateur d'intégration

Variante

☞ La latence est l'équivalent d'une « inertie » ou d'une « pseudo masse »

AGIR

dans l'environnement dans la temporalité de cet environnement



VOIR

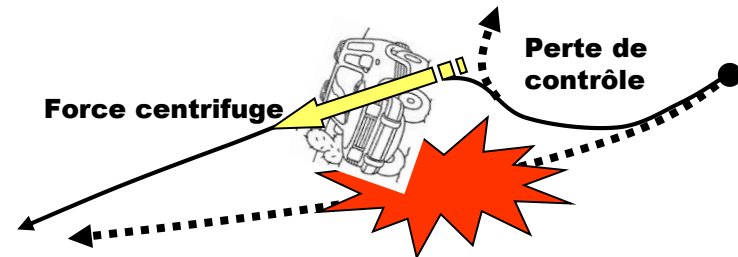
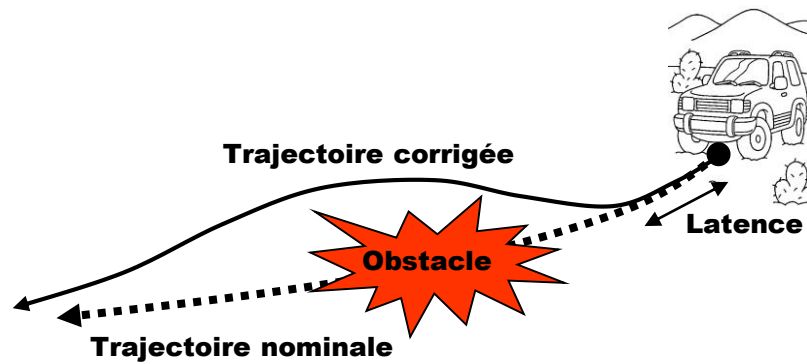
COMPRENDRE

MÉMORISER

TRANSMETTRE

Et de l'énergie pour le contrôle

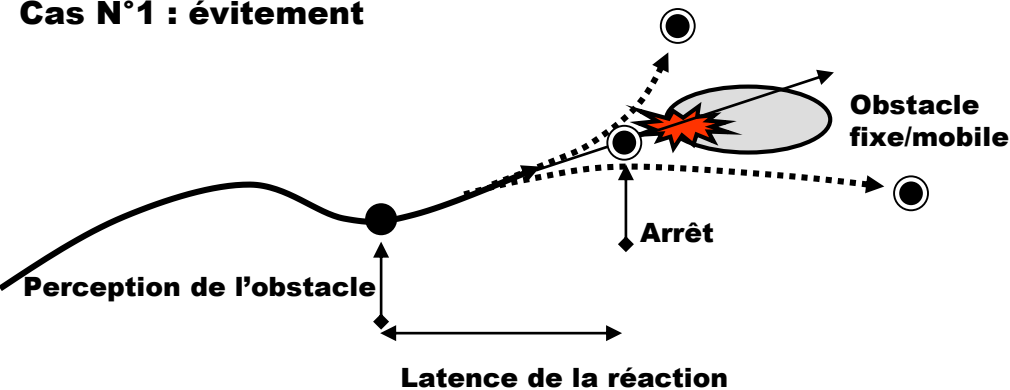
Contrôle d'obstacle 1/2



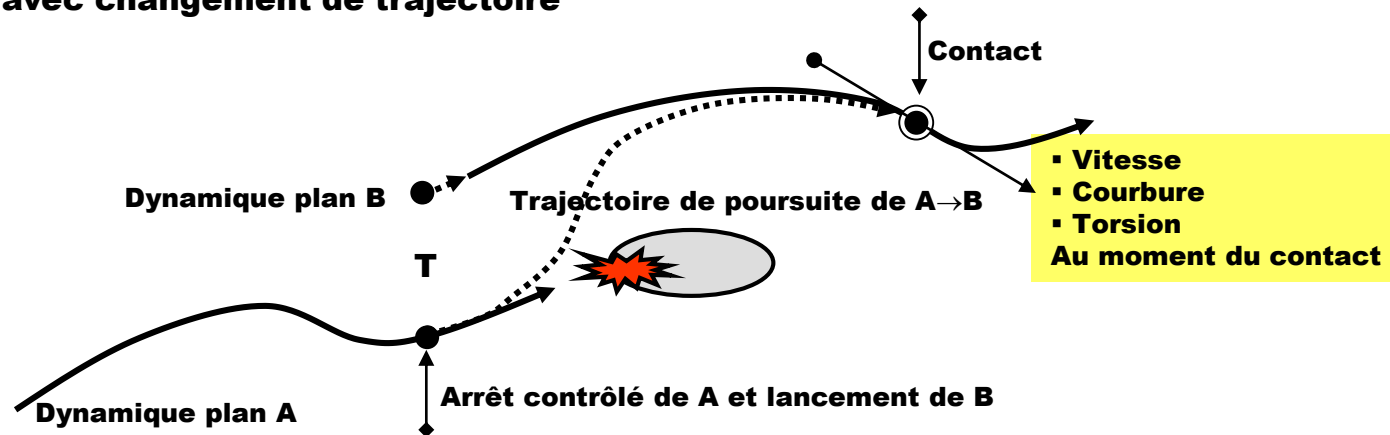
Contrôle d'obstacle 2/2

Évitement et changement de trajectoire

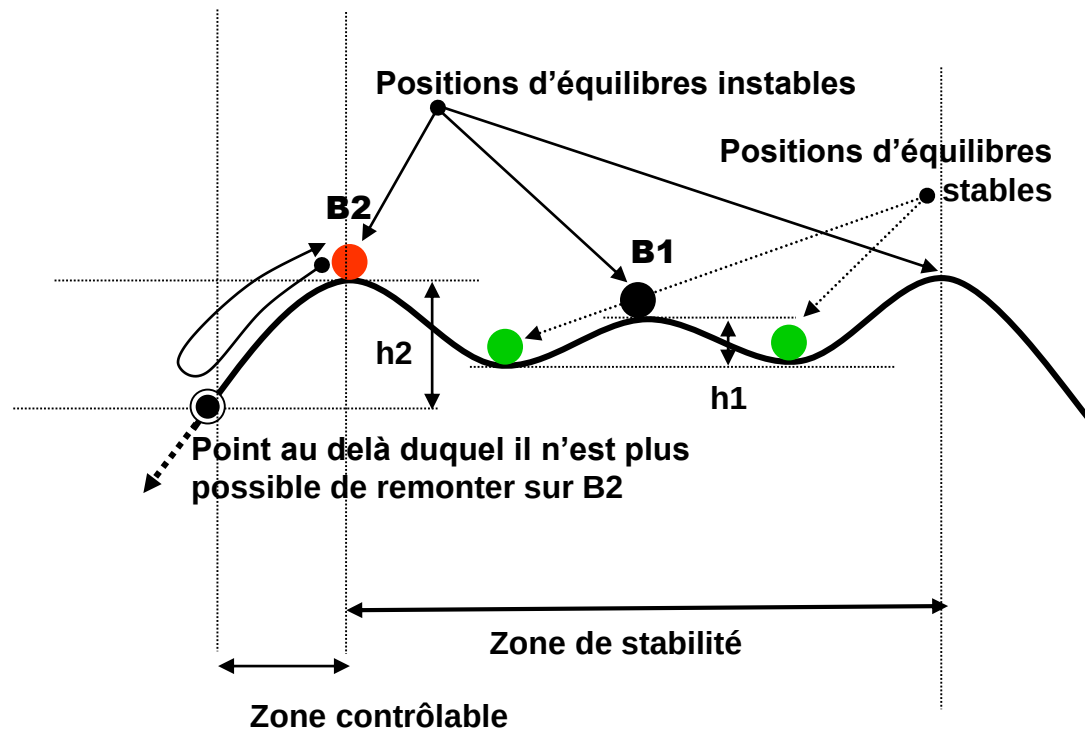
Cas N°1 : évitement



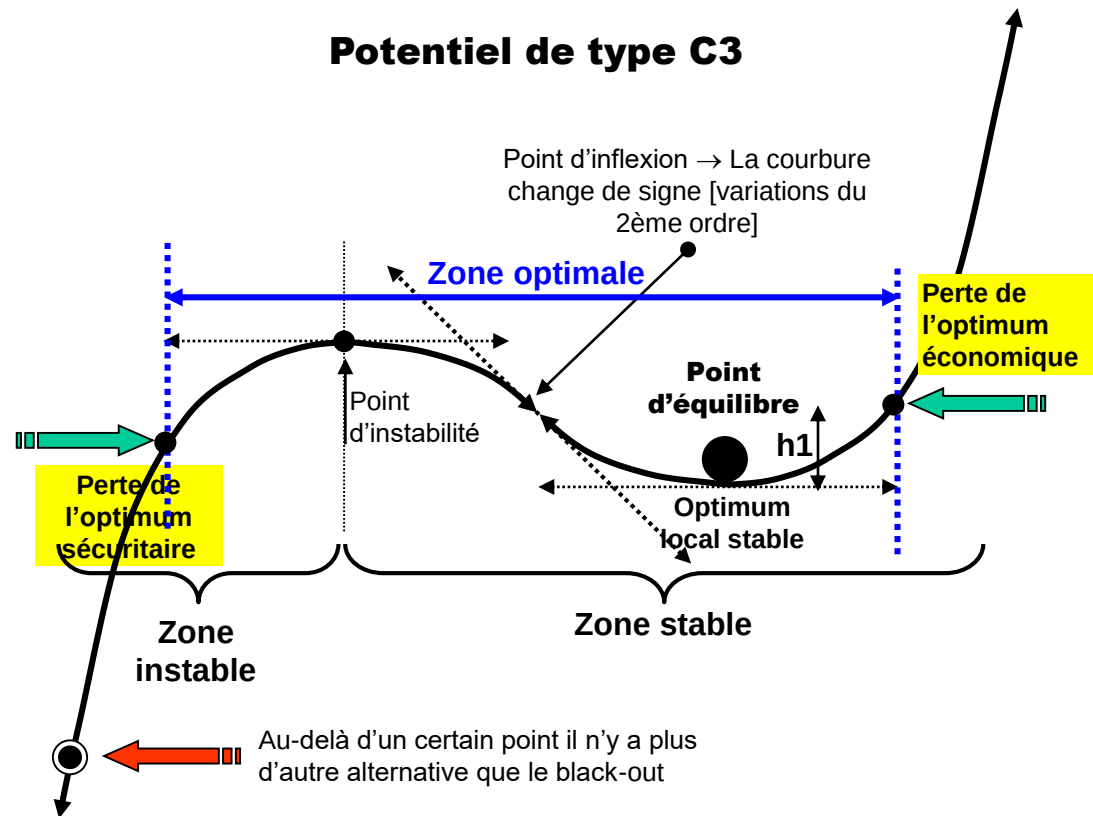
Cas N°2 : course poursuite avec changement de trajectoire



Potentiel stable en « chapeau mexicain »

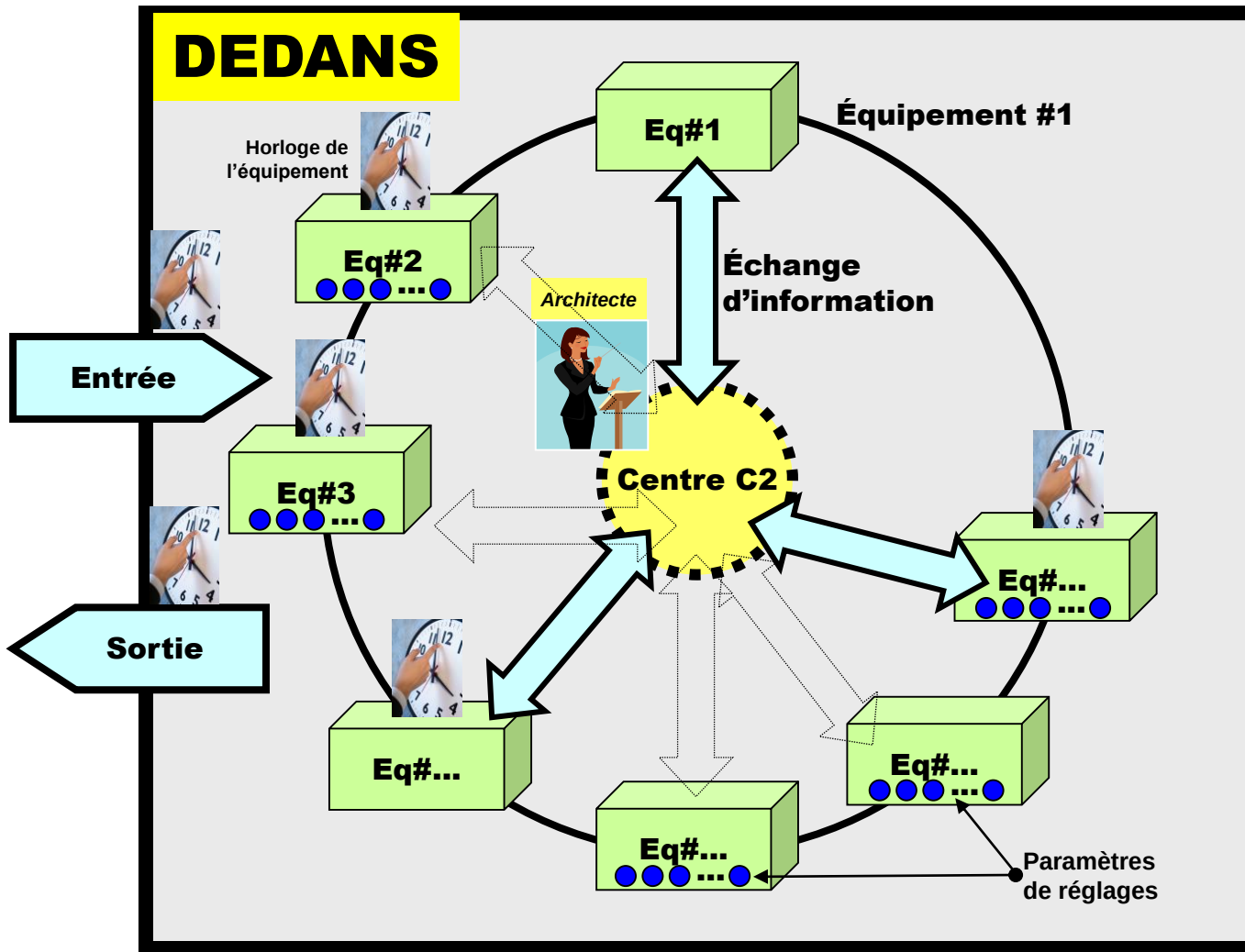


Potentiel instable



Systeme

DEDANS



DEHORS

**Visible
et
Invisible**

Environnement

Politique
Economique
Social
Technique
Ecologique
Légal

Le [méta] modèle/référentiel ☞ Centre et principe organisateur des systèmes

☞ Tout système a une **finalité** → Pourquoi est-il là, maintenant et pas hier ? **quel est son but** ?

→ Par son existence même, tout système introduit une dichotomie **DEDANS** ⇔ **DEHORS** → le SOI et le NON SOI – **C'est une dualité fondamentale**, distincts mais indissociables

☞ Pour interagir avec le DEHORS, via les flux d'échanges, afin de croître, et maintenir ses invariants structurels internes, **le méta modèle du système doit disposer d'un modèle abstrait de son environnement** → Surveiller, s'adapter, évoluer
→ Qu'est ce qui est « **Bon / Avantageux** » et/ou « **Dangereux / Désavantageux** » pour lui-même ?

☞ Pour **exister**, tout système doit d'abord **être construit** → Qui est l'**architecte** ? Quelle ingénierie ? Selon quel référentiel ?

Le problème de von Neumann, et de Shannon ➡ Les erreurs ... de toute

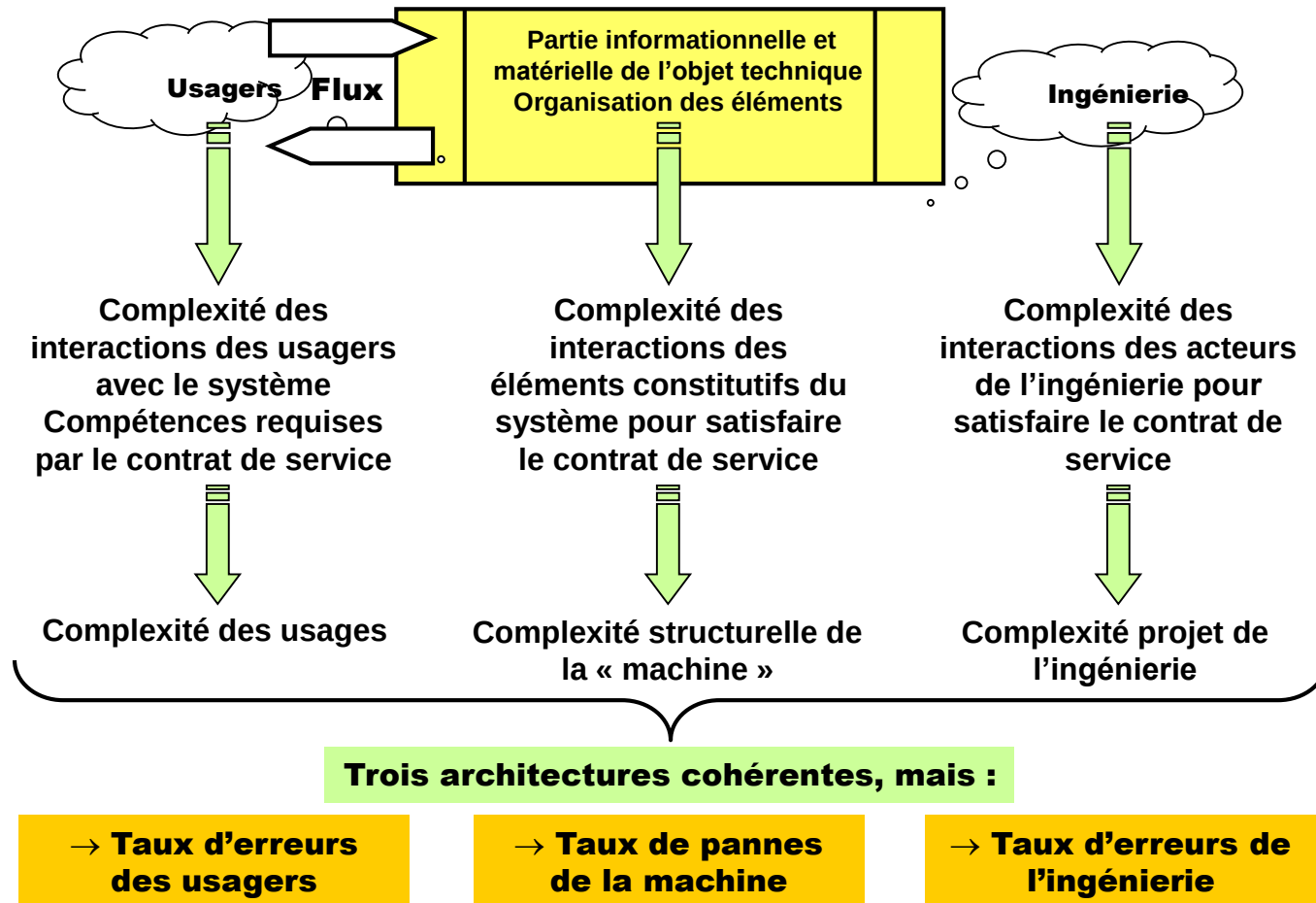


na



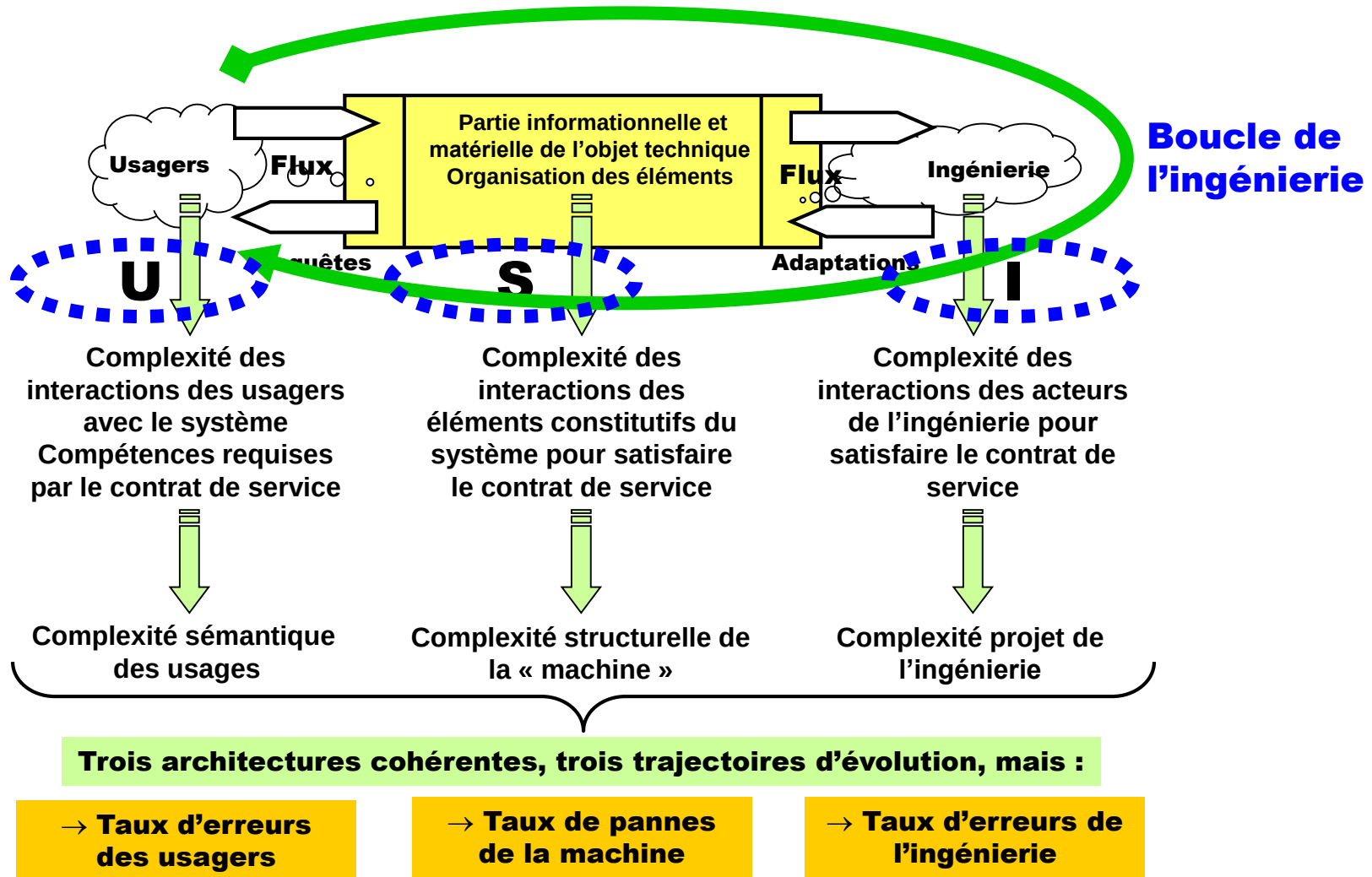
Règle fondamentale de l'ingénierie : Faire de l'erreur la préoccupation N°1, à tous les niveaux

Architecturer/organiser la complexité

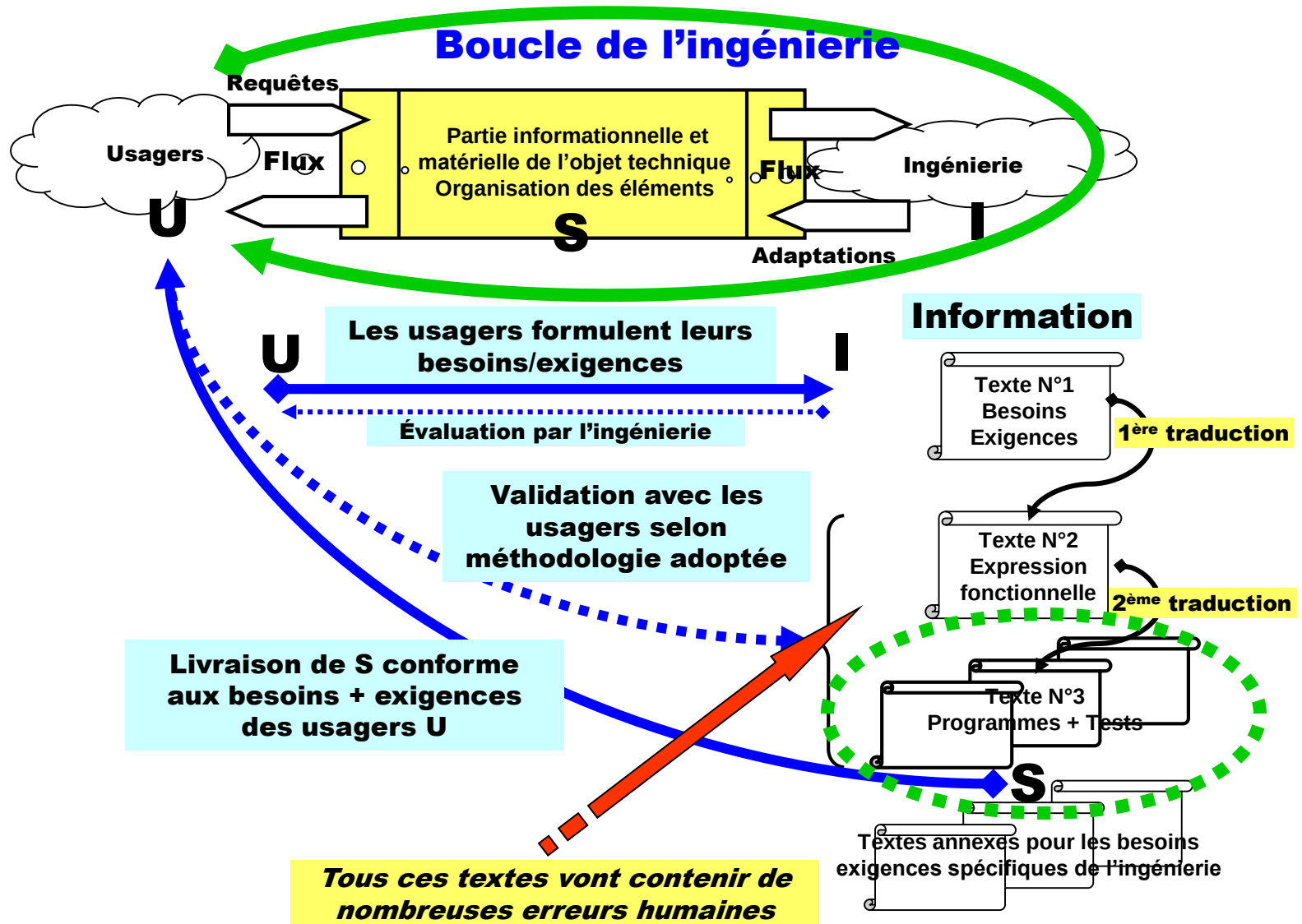


Les erreurs humaines apparaissent comme le facteur principal de complexification

Le triplet de Simondon → Les trois complexités des systèmes technologiques



Le triplet de Simondon → Outil d'analyse



Le problème de Shannon : communiquer efficacement, sans erreurs

The Shannon-Weaver Mathematical Model, 1949

Émetteur

Récepteur

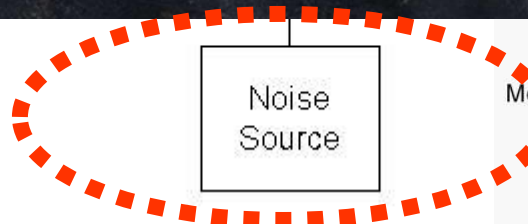


$$H = -\sum p(x) \log p(x)$$

sage

Concepts:

Entropy
Redundancy
Noise
Channel Capacity



Monde physique
exubérant

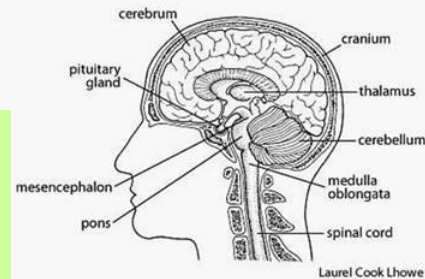
On enlève la
redondance inutile

On ajoute de la
redondance subtile

→ Codage de source →

Codage de canal →

Monde mental,
parcimonieux et
robuste

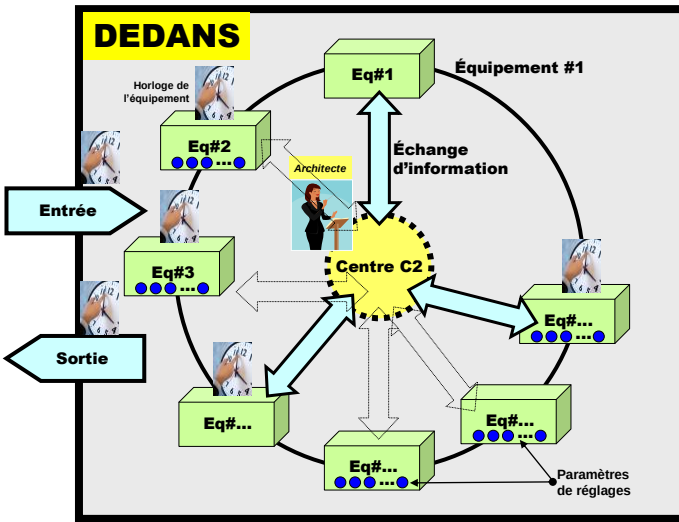


Il n'y a pas de communication d'information entre les acteurs : a) sans interactions énergétiques et b) sans conventions entre les acteurs

👉 Le langage est avant tout intensionnel, conventionnel, énergétique et redondant

Comment garantir la fiabilité de l'ensemble « système » ?

Système



DEHORS

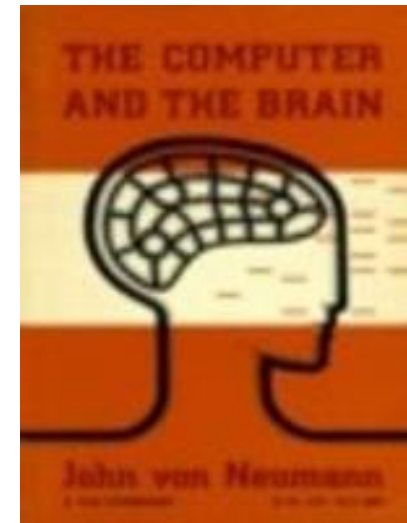
Visible
et
Invisible

Environnement

P
E
S
T
E
L

➡ Dans une telle structure, l'erreur est partout : dans les matériaux constitutifs des équipements, dans l'organisation, dans la « programmation » au sens large, dans les communautés humaines [5 à 10 erreurs par heure d'activité] d'utilisateurs et/ou d'ingénierie.

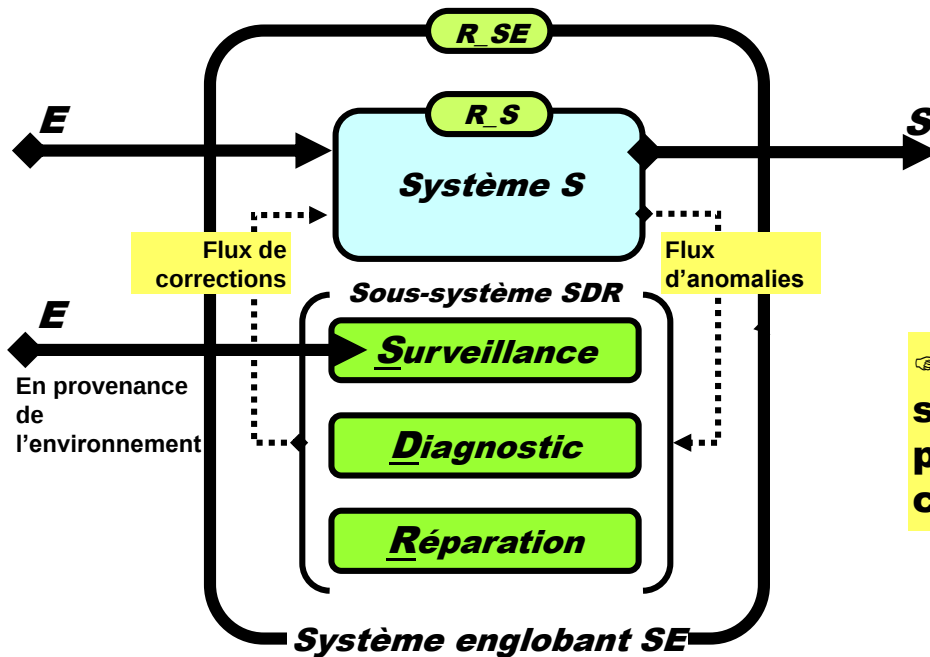
➔ Von Neumann était fasciné par la fiabilité du cerveau



Défauts et erreurs font partie de notre univers visible et invisible, parfois utiles, souvent nuisibles, toujours redoutées

Vivre et/ou survivre

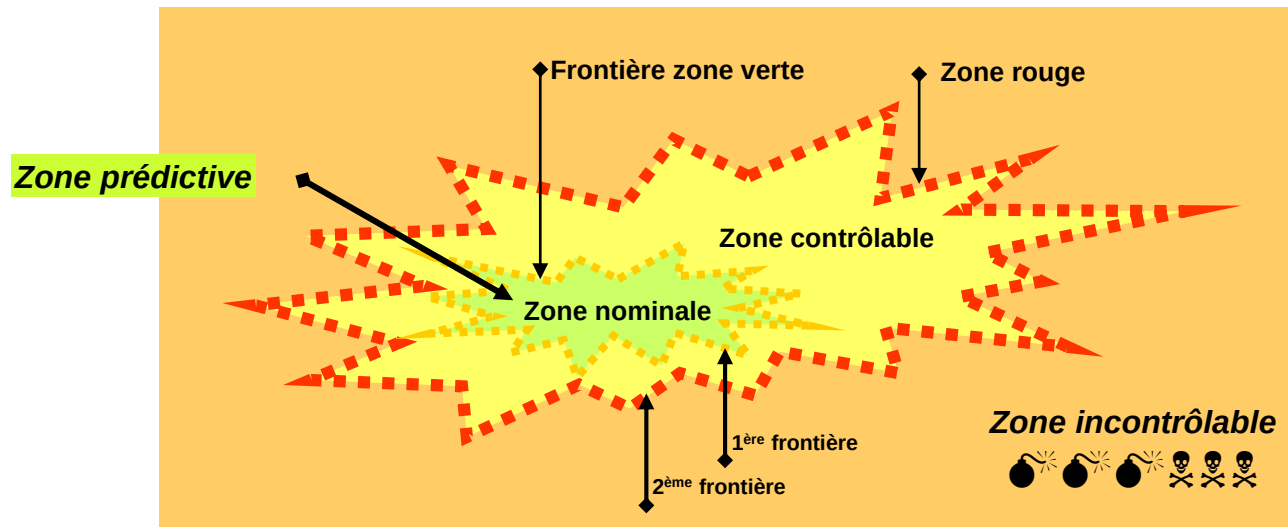
👉 Compenser les erreurs ou mourir



👉 Il faut une réserve d'énergie suffisante et sécurisée pour pouvoir compenser en toute circonstance

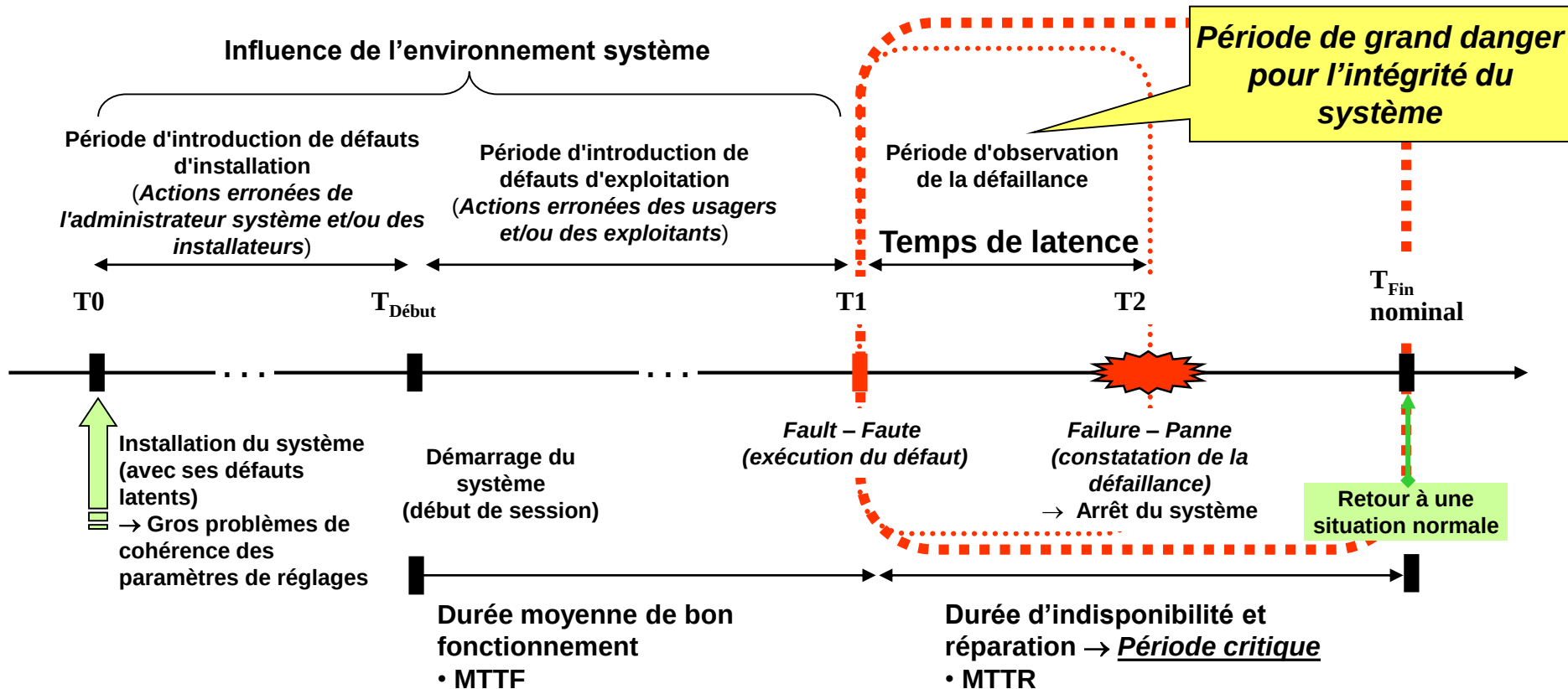
👉 Il faut, pour agir, disposer d'un modèle des comportements déviants par rapport au fonctionnement « normal » [nominal] du système

Prédire et contrôler : les frontières



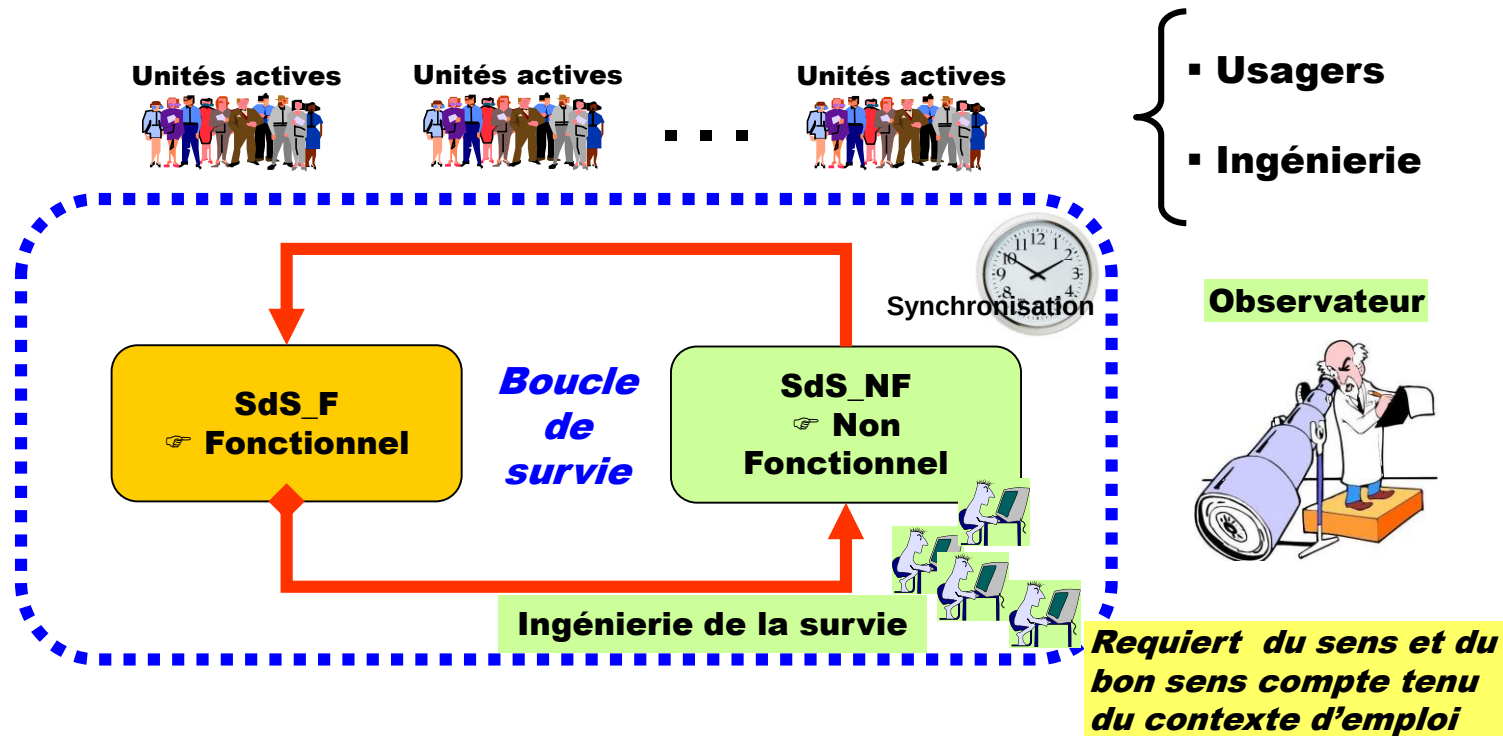
Un propos de von Neumann rapporté par le physicien Freeman Dyson :
"All stable processes we shall predict. All unstable processes we shall control"
Mais ce n'est peut-être qu'un rêve ...

La chaîne de l'erreur



Systeme de Systemes

Complémentarité Fonctionnel/Non fonctionnel



**Propriété fondamentales des erreurs aléatoires :
elles ne se reproduisent **jamais** à l'identique**

Vous avez dit : construire, intégrer ...

↪ **La systémique – Science des systèmes finalisés – est **simultanément** un **langage** de processus ET une **méthode** pour **organiser** et **architecturer** la complexité qui nous est bien utile** [Ph. Anderson “*More is different*”]

☞ **C’est fondamentalement ce qui nous permet de « doser » la complexité que nous savons **collectivement** utiliser en gardant le contrôle du système**

➔ **C’est un **langage universel****

Pour conclure ...

- ↪ **La science des systèmes** n'est pas une science « académique » au sens classique du terme, mais une science **intégrée** de l'action humaine – une ingénierie – finalisée pour produire/maintenir des objets/systèmes techniques utiles à la société
 - ☞ **Son enseignement reste difficile**
- ↪ **C'est une ingénierie de l'intégration articulée autour d'un Opérateur d'Intégration explicite / explicité**

➤ dont certains biologistes commencent à sentir la nécessité

[☞ cf. Henri Atlan, *Le vivant post-génomique*, Philippe Kourilsky, *Le jeu du hasard et de la complexité*, Jean-Louis Dessalles, et alii, *Le fil de la vie – La face immatérielle du vivant, ...*]